



EESTI MAAÜLIKOOL

Tehnikainstituut

Ronald Kändla

**MATERJALI SOOJUSJUHTIVUSE
EKSPRESSMÕÕTUR**

THERMAL INSULATION TEST GAUGE

Magistritöö

Energiakasutuse eriala

Juhendaja: Veli Palge, *D.Sc. (Tech.)*

Tartu 2019

Eesti Maaülikool		Magistritöö lühikokkuvõte	
Kreutzwaldi 1, Tartu 51014			
Autor: Ronald Kändla		Õppekava: Energiakasutus	
Pealkiri: Materjali soojusjuhtivuse ekspressmõõtur			
Lehekülgi: 90	Jooniseid: 43	Tabeleid: 8	Lisasid: 8
Osakond / Õppetool: Energiakasutus			
ETIS-e teadusvaldkond: 4.17 Energeetikaalased uuringud			
CERC S-i kood: T140 Energeetika			
Juhendaja: Veli Palge, D.Sc.(Tech.)			
Kaitsmiskoht ja -aasta: Tartu, 2019			
Soojusjuhtivuse mõõturid on raskesti kättesaadavad ning soojusjuhtivust mõõdetakse üldjuhul statsionaarse mõõtmeseadmega varustatud laboris.			
Käesoleva magistritöö eesmärgiks oli konstrueerida materjali soojusjuhtivuse ekspressmõõtuuri prototüüp.			
Materjali soojusjuhtivuse mõõtmine seisneb uuritava katsekeha ühe pinna kuumutusplaadiga stabiilse temperatuuriga kuumutamises ning materjali läbiva soojusvoo stabiliseerumisel, teise, vastaspoolse pinna temperatuuri fikseerimises.			
Konstrueeritud süsteem võimaldab täita järgmiseid nõudeid:			
<ul style="list-style-type: none">• Temperatuuride ja kuumutusplaadi võimsuse mõõtmine ja salvestamine välisele andmekandjale;• Kuumutusplaadi temperatuuri hoidmine püsival väärtusel;• Mõõtmisprotsessi olekuparameetrite salvestamine ja reaajas monitoorimine soojusjuhtivuse mõõtja arvutis.			
Töö esimene pool kirjeldab Scilab Xcos keskkonnas modelleeritud ekspressmõõtuuri soojuslevi elektrilist aseskeemi ja simulatsiooni tulemusi. Töö teises pooles valiti eelpool loetletud nõuete täitmiseks vajalikud seadmed, millele järgnes mõõtuuri konstrueerimine ja mõõtuuri juhtkontrolleri programmeerimine. Testmõõtmiste põhjal selgus, et mõõtuuri süsteem on toimiv. Lisaks on töö autori arvamusel käesoleva töö lisandväärtuseks modelleeritud ekspressmõõtuuri mudel mille abil on võimalik mõõtuuri soojuslevi seaduspärasustest paremini aru saada ja konstrueeritud ekspressmõõtuuri edasi arendada.			
Märksõnad: Scilab Xcos, soojuslevi, soojusjuhtivus, programmeerimine			

Estonian University of Life Sciences Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Abstract of Master's Thesis	
Author: Ronald Kändla		Curriculum: <i>Energy Engineering</i>	
Title: <i>Thermal Insulation Test Gauge</i>			
Pages: 90	Figures: 43	Tables: 8	Appendixes: 8
Department / Chair: Field of research and (CERC S) code: Natural Sciences and Engineering 4.17, Energetic Research T140 Energy research Supervisors: D.Sc.(Tech.) Place and date: Tartu 2019			
<p>Thermal insulation test gauge systems are difficult to access and measurements are generally performed in a laboratory which is equipped with a stationary measuring device. The purpose of this Master's thesis was to construct a prototype of thermal insulation test gauge.</p> <p>Measuring the thermal conductivity of the material consists of heating the sample surface within stable temperature hot plate and when the heat flow through the material stabilizes, the temperature of the opposite surface will be recorded.</p> <p>The designed system has to be met with the following requirements:</p> <ul style="list-style-type: none">• Measuring and saving data of temperatures and hotplate electrical power to external storage device;• Automatic hot plate temperature control;• Recording and real-time monitoring of the measurement process on a local computer. <p>The first part of the work describes in Scilab Xcos's modeled heat transfer simulation of test gauge which is based on electrical schematic. In the second half of the work, the equipment which meets the above requirements was chosen. For next, the programming of the controller and construction was made. Testing results showed that constructed gauge is functional system.</p> <p>In addition, the author believes that the extra added value of this work is in Scilab Xcos built gauge model which makes better to understand the thermodynamic laws of the meter's heat transfer and it is also a useful tool for further development.</p>			
Keywords: Scilab Xcos, heat transfer, thermal conductivity, programming			

SISUKORD

TÄHISED JA LÜHENDID	6
SISSEJUHATUS	8
1. METOODIKA JA MATERJALIDE VALIK	9
1.1 Metoodika	9
1.2 Materjalide valik	10
2. SEADME STRUKTUURI KIRJELDUS	14
3. MATERJALI SOOJUSJUHTIVUSE EKSPRESSMÕÕTURI SIMULATSIOON KESKKONNAS SCILAB	17
3.1 Scilabis modelleeritud skeemi põhimõte ja sümbolid	17
3.2 Temperatuuri reguleerimine	21
3.3 Konstruktsioonelementide soojuslevi elektriline aseskeem	22
3.4 Soojusjuhtivuse arvutamine	24
3.5 Konvektiivse soojuslevi arvutamine	28
3.6 Kiirguslik soojuslevi	33
3.7 Scilabis ja Fusion 360-nes modelleeritud simulatsiooni tulemused	34
4. KONSTRUEERIMINE	40
4.1 Mõõtekamber	40
4.2 Kuumutusplaat	41
4.3 Kontroller	45
5. KONTROLLERI PROGRAMMEERIMINE	47
5.1 PI-temperatuuri regulaator	47
5.1.1 PI-regulaatori võimendustegurite leidmine	50
6. MATERJALI SOOJUSJUHTIVUSE EKSPRESSMÕÕTURI TESTMÕÕTMISED ...	53
6.1 Soojusvoo leidmise võimalusi ekspressmõõduri testimisel	53
6.2 Materjalide soojusvoo mõõdetulemused	55
KOKKUVÕTE	62
KASUTATUD KIRJANDUS	64
LISAD	66
Lisa A. Soojusjuhtivuse ekspressmõõduri elektrilise aseskeemi mudel	67
Lisa B. Scilab Xcos modelleeringu lähtekood	70
Lisa C. Scilabis modelleeritud simulatsiooni tulemused	76
Lisa D. Fusion 360 modelleeritud simulatsiooni tulemused	80
Lisa E. Kontrolleri lähtekood	82
Lisa F. Kuiva õhu füüsikalised omadused	87
Lisa G. Isotermiliste pindade konstandid	88

Lisa H. Juhtkontrolleri trükkplaadi elektriline ühendusskeem.....	89
LIHTLITSENTS.....	90

TÄHISED JA LÜHENDID

β_{ohk}	-	ideaalgaasi ruumpaisumistegur K;
ΔT	-	temperatuuride vahe K;
a	-	pikkus m;
b	-	laius m;
c	-	erisoojus J/(kg·K) ;
C	-	soojusmahtuvus J·K ⁻¹ ;
cl	-	pindala ja ümbermõõdu suhe;
DC	-	duty cycle, töötsükkel %;
e	-	materjali kiirgustegur;
f	-	sagedus Hz;
g	-	maa raskuskiirendus m/s ² ;
Gr	-	Grashofi arv;
H	-	vertikaalpinna kõrgus m;
I	-	voolutugevus A;
k_i	-	I-komponendi võimendustegur;
k_p	-	P-komponendi võimendustegur;
K_{pu}	-	P-komponendi stabiilne võimendustegur;
m	-	mass kg;
Nu	-	Nusselti arv;
OSB	-	puitlaastplaat;
P_{kesk}	-	Keskmine võimsus W;
Pr	-	Prandtli arv;
PWM	-	pulse width modulation, pulsilaiusmodulatsioon;
q	-	soojusvoog W;
$q_{kiirguslik}$	-	piirete kiirguslik soojuslevi võimsus W;
$q_{konvektiivne}$	-	piirete konvektiivne soojuslevi võimsus W;
$q_{väljuv}$	-	mõõturist väljuv soojusvoog W;
R	-	takistus Ω;
R^2	-	determinatsioonikordaja;
Ra	-	Grashofi ja Prandtli arvu korrutis;
R_{soojus}	-	soojustakistus (m ² ·K)/W;
RTC	-	real time clock, reaalaajakell;

S	- pindala m^2 ;
t	- aeg s;
T	- periood s;
T_1	- algtemperatuur K;
T_2	- lõpptemperatuur K;
T_∞	- mõõduri pinna temperatuur $^{\circ}C$;
T_f	- õhu piirikihi keskmine temperatuur $^{\circ}C$;
$T_{impulss}$	- impulsi kestvus s;
T_u	- siinuse periood s;
T_v	- ümbritsevate pindade temperatuur, ruumitemperatuur;
T_w	- ruumi õhu temperatuur $^{\circ}C$;
U	- pinge V;
V	- ruumala m^3 ;
$\nu_{\delta hk}$	- õhu kinemaatiline viskoossus m^2/s ;
$x\%$	- hälve protsentides %;
α	- vabakonvektsiooni soojusülekandevegur $W/(m^2 \cdot K)$;
δ	- paksus m ;
λ	- soojusjuhtivus $W/(m \cdot K)$;
$\lambda_{arvutuslik}$	- arvutuslik soojusjuhtivus $W/(m \cdot K)$;
λ_{dok}	- materjali dokumentatsioonis esitatud soojusjuhtivus;
$\lambda_{mõõdet}$	- mõõdetud materjali soojusjuhtivus $W/(m \cdot K)$;
ρ	- tihedus kg/m^3 ;
σ	- Stefan-Boltzmanni absoluutselt musta keha kiirgustegur.

SISSEJUHATUS

Soojust isoleerivate materjalide soojusjuhtivust mõõdetakse materjali tootja tellimisel sertifitseeritud laborites. Kättesaadavad on ka mitmesugused materjalid mille soojusjuhtivuse kohta tootja poolne info puudub. Viimasel ajal on kasutusele võetud ka looduslikke materjale, mille soojusjuhtivust pole mõõdetud.

Näiteks vanade puitkarkassmajade puhul, kus soojustusena on kasutatud saepuru-lubja segu, oleks enne täieliku renoveerimise otsust otstarbekas soojusisolatsiooni soojusjuhtivust mõõta. Soojusjuhtivuse mõõturid on raskesti kättesaadavad ja üldjuhul on võimalik mõõtmisi teostada statsionaarse mõõtmeseadmega varustatud laboris.

Materjali soojusjuhtivuse ekspressmõõturite kättesaadavuse parendamine võimaldab suurendada teadmistepõhist ehitust ja täiendada materjalide andmebaasi.

Käesoleva magistritöö eesmärgiks oli projekteerida ja konstrueerida materjali soojusjuhtivuse ekspressmõõturi prototüüp. Konstrueeritava süsteemi põhimõtteline idee pärineb *ICS* standardist *EVS-EN 12667:2001*.

Materjali soojusjuhtivuse mõõtmine seisneb uuritava katsekeha ühe pinna stabiilse temperatuuriga kuumutusplaadiga kuumutamises, ning materjali läbiva soojusvoo stabiliseerumisel teise vastaspoolse pinna temperatuuri fikseerimises.[1, 2]

Töö autori arvates on antud teema aktuaalne ja huvitav, ning funktsioneeriva süsteemi loomisel lihtsasti reprodutseeritav.

Konstrueeritud süsteem peab täitma järgmiseid nõudeid:

- Temperatuuride ja kuumutusplaadi võimsuse mõõtmine ja salvestamine välisele andmekandjale;
- Kuumutusplaadi temperatuuri hoidmine püsival väärtusel;
- Mõõtmisprotsessi olekuparameetrite salvestamine ja reaajas monitoorimine soojusjuhtivuse mõõtja arvutis.

Töö esimene pool kirjeldab soojusjuhtivuse ekspressmõõturi modelleeritud soojuslevi elektrilist askeemi ja simulatsiooni tulemusi.

Töö teises pooles valitakse eelpool loetletud nõuete täitmiseks vajalikud seadmed millele järgneb mõõturi konstrueerimine ja mõõturi juhtkontrolleri programmeerimine.

1. METOODIKA JA MATERJALIDE VALIK

1.1 Metoodika

Mõõteseadmesse asetatakse uuritav materjal ning soojendatakse seda püsiva temperatuuriga T_1 kuumutusplaadiga ühe pinna poolt nii kaua kuni soojusvoog q läbi materjali on stabiliseerunud. Seejärel mõõdetakse materjali teise poole pinna temperatuur T_2 . Vastavalt soojendatavale võimsusele ning temperatuuride vahele ΔT avaldatakse materjali soojusjuhtivustegur (joonis 1.1).[2]

Soojusjuhtivustegur leitakse valemiga [2: 18]

$$\lambda = \frac{\delta \cdot q}{S \cdot \Delta T}, \quad (1.1.)$$

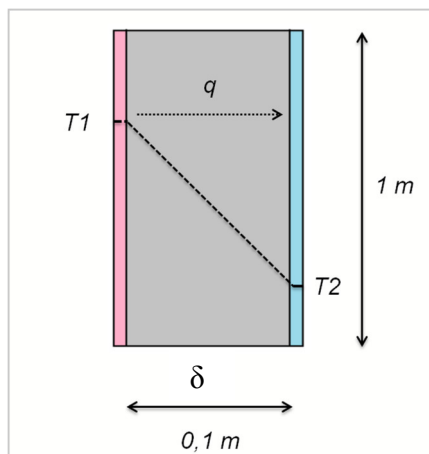
kus λ on soojusjuhtivustegur, W/(m·K);

δ - materjali paksus, m;

q - soojusvoog, W;

S - pindala, m²;

ΔT - temperatuuride vahe, K.



Joonis 1.1. Soojusjuhtivuse määramise põhimõtteskeem

Näiteks soojendatakse tundmatut materjali alumist pinda 60 °C juures asuva kuumutusplaadiga, pindalaga 1 m² ja paksusega 0,1 m. Soojusvoo stabiliseerumisel fikseeritakse uuritava materjali pealmise pinna temperatuur ja kui see on näiteks 34 °C

ning soojusvoog on 70 W, siis leiame vastavalt valemile (1.1) tundmatu materjali soojusjuhtivusteguri

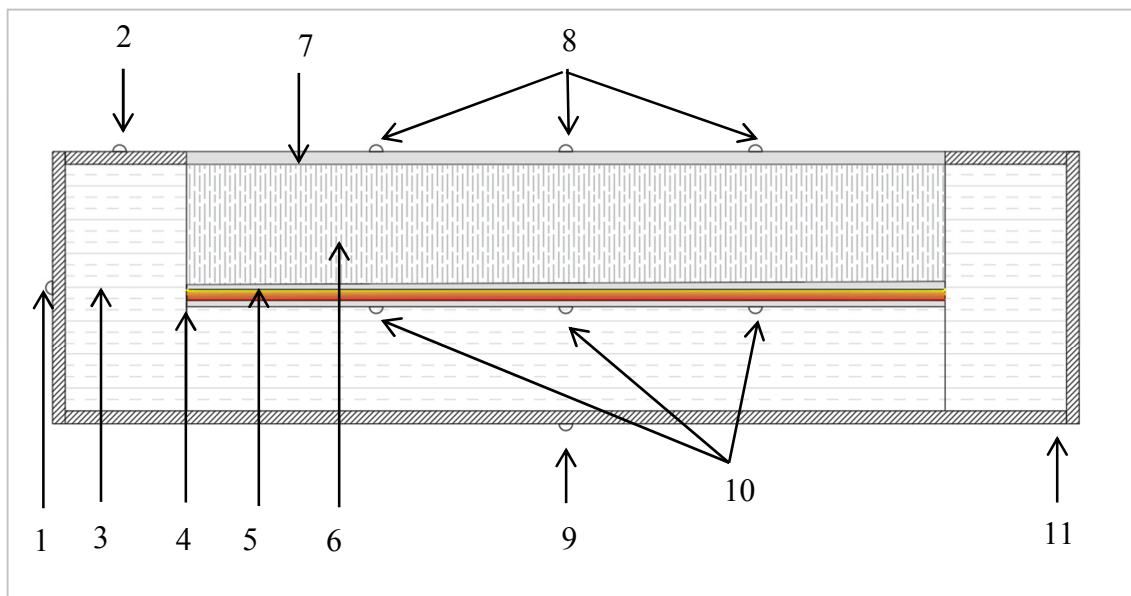
$$\lambda = \frac{d \cdot q}{S \cdot \Delta T} = \frac{0,1 \cdot 70}{1 \cdot (333,15 - 307,15)} = 0,27 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}, \quad (1.2.)$$

Kirjeldatud tingimustel saadi soojusjuhtivusteguri väärtuseks 0,27 W/(m·K).

1.2 Materjalide valik

Katsekambri välismõõdud võeti lähtudes arvestusest, et seda oleks võimalik transportida sõiduautoga.

Katsekambri konstruktsiooni põhimõtte on esitatud joonisel 1.2.



Joonis 1.2. Katsekambri läbilõige. 1 – Temperatuurisensor (vertikaalpinna temperatuur); 2 – Temperatuurisensor (pealmise horisontaalpinna äärmise ala temperatuur); 3 - Polüstüreenist piire; 4 - Alumiiniumist kuumutusplaat; 5 - Takistustraadist küttekeha; 6 - Katseobjekt; 7 –Alumiiniumist katteplaat; 8 –Temperatuurisensor (T2); 9 – Temperatuurisensor (alumise horisontaalpinna temperatuur); 10 – Temperatuurisensor (T1); 11 - OSB (puitlaastplaat) kate.

Katsekambri soojusisolatsiooniks on kasutatud vahtpolüstireeni. Tegu on väga hea ja soodsa soojusisolaatoriga tänu millele vähendatakse olulisel määral väliskeskkonna mõjusid. Lisaks on katsekamber ümbritsetud 6 mm *OSB* (puitlaastplaat) plaadiga, kaitsmaks transportimise käigus võimalike tekkivate kahjustuste eest.

Konstrueeritava mõõteseadme ja mõõdetavate materjalide füüsikalised omadused on esitatud tabelis 1.2.

Tabel 1.2. Mõõteseadme konstruktsioonmaterjalide füüsikalised omadused [3-6]

Materjal	Soojusjuhtivus, W/(m·K)	Erisoojus, J/(kg·K)	Tihedus, kg/m ³	Mustvärvusaste
Vahtpolüstireenplaat EPS 100	0,037	1000	19,1	-
<i>OSB</i> (puitlaastplaat)	0,13	2720	420	0,91
Alumiiniumplaat (sulam 1050)	229	899	2700	0,09

Materjalide soojusjuhtivuse mõõtmiseks paigutatakse ekspressmõõtur ruumi, kus on võimalik hoida temperatuuri võimalikult stabiilsena. Katsekamber projekteeriti nii, et maksimaalne osa kuumutusplaadilt eralduvast soojusest läbiks uuritavat materjali. Materjali soojusjuhtivuse arvutamisel võetakse arvesse ka läbi soojusisolatsiooni kaudu väljuvat soojust.

Katsekambri materjalide valikul arvestati lisaks soojustehnilistele omadustele ka materjalide maksumust ja kättesaadavust. Füüsiliselt suurema koormustaluvusega polüstireenplaate *EPS100* oli standardmõõtudena saada paksusega 0,025 m, 0,05 m, 0,075 m ja 0,1 m.

Optimaalne isolatsiooni paksus polüstireenist piirde puhul leiti arvutustega kus püsival kuumutamisel tõsteti pindalaga 1 m² isolatsiooni paksust 0,01 m kaupa kuni paksuseni 1 m. Kuumutusplaadi temperatuuriks *T1* valiti 60 °C ning välistemperatuuriks *T2* 0 °C. Soojuskadude arvutamisel arvestati, et ekspressmõõtuuri temperatuur on võrdne ruumi temperatuuriga.

Soojuskadu polüstüreenist piirde kaudu leiti valemiga [1: 33]

$$q = \frac{\Delta T}{R_{soojus}}, \quad (1.3.)$$

kus q on väljuv soojusvoog, W;

R_{soojus} - materjali soojustakistus, (m²·K)/W;

ΔT - temperatuuride vahe, K.

Materjali soojustakistus leiti valemiga [1: 33]

$$R_{soojus} = \frac{1}{\frac{S \cdot \lambda}{\delta}}, \quad (1.4.)$$

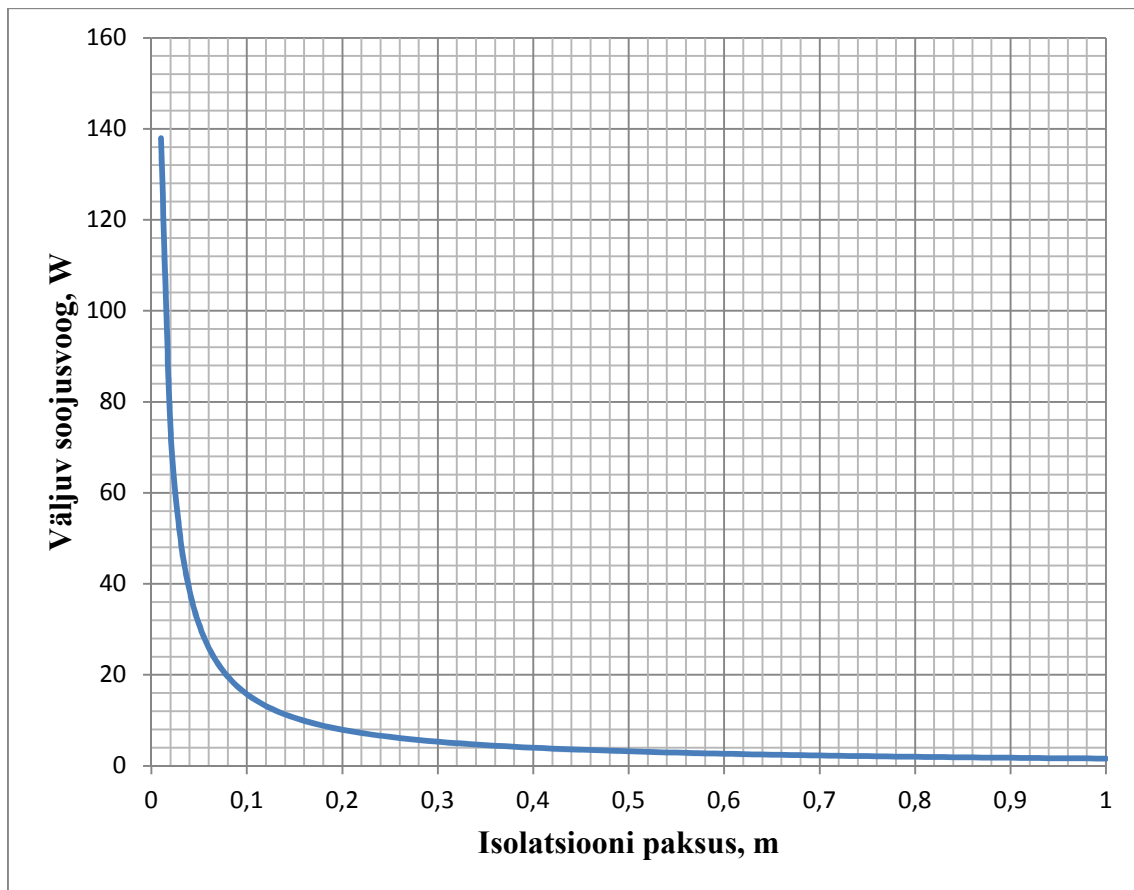
kus R_{soojus} on soojustakistus, (m²·K)/W.

S - pindala, m²;

δ - paksus, m;

λ - soojusjuhtivus W/(m·K).

Arvutustulemused on esitatud graafikul joonisel 1.3



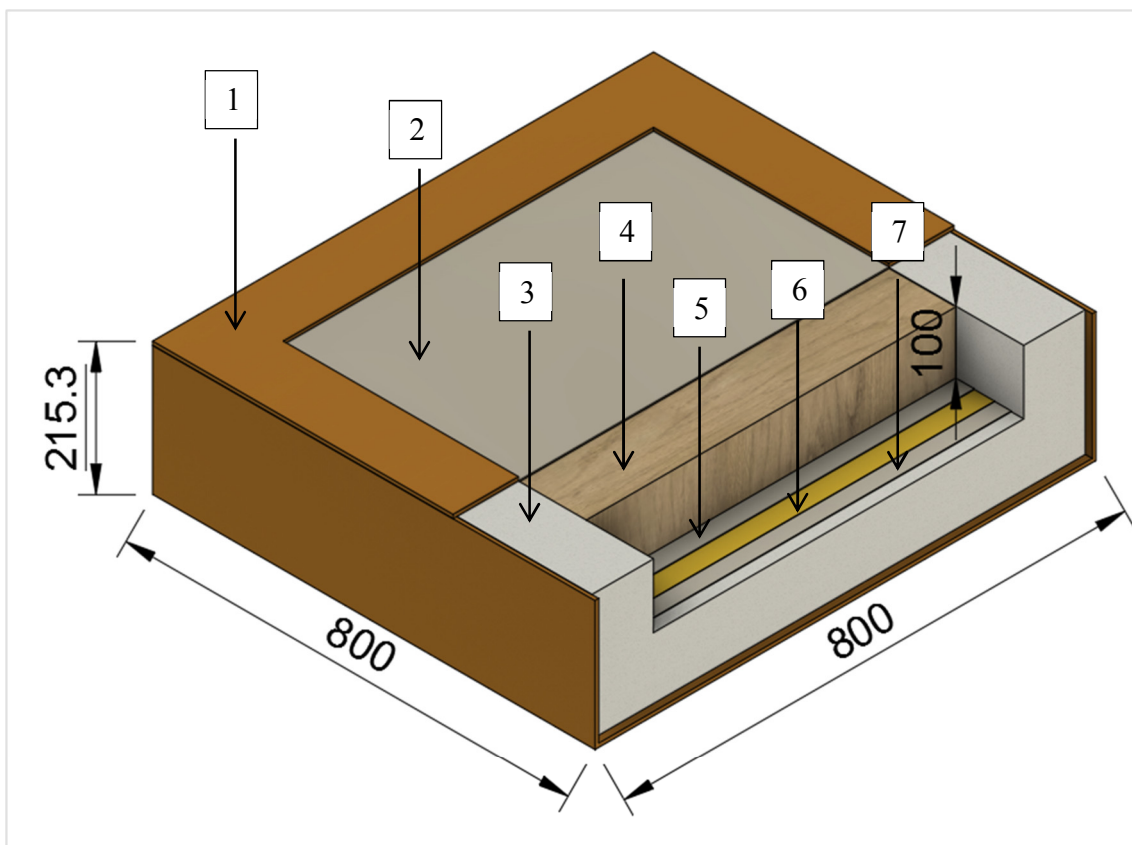
Joonis 1.3. Isolatsiooni paksusest sõltuv läbi kanduv soojusvoog

Nagu jooniselt 1.3 on näha siis isolatsiooni paksuse kasvades soojuskaod stabiliseeruvad ning näiteks 0,3 m juures ei ole enam optimaalne paksemat kihti kasutada. Kui kasutada 0,1 m paksust isolatsiooni siis väljuv soojusvoog on 8 W. Kui kasutada 0,3 m paksust isolatsiooni siis väljuv soojusvoog on 2,5 W.

2. SEADME STRUKTUURI KIRJELDUS

Mõõteseadmes toimuvate soojusprotsesside uurimiseks loodi keskkonnas Scilab 5.5.2 mõõturi soojustehnilisi omadusi arvestav elektriline aseskeem.

Simulatsioon võimaldab võrrelda omavahel konstrueeritud mõõteseadmega korraldatud katse tulemusi ja mudeli abil simulatsiooni protsessi tulemusi ning vajadusel teha vajalike korrekture. Lisaks modelleeriti raalprojekteerimise programmiga Fusion 360 mõõteseadme kolmemõõtmeline joonis (joonis 2.1). Programmi keskkonnas on võimalik teostada lõplike elementide meetodil soojuslevi analüüs.



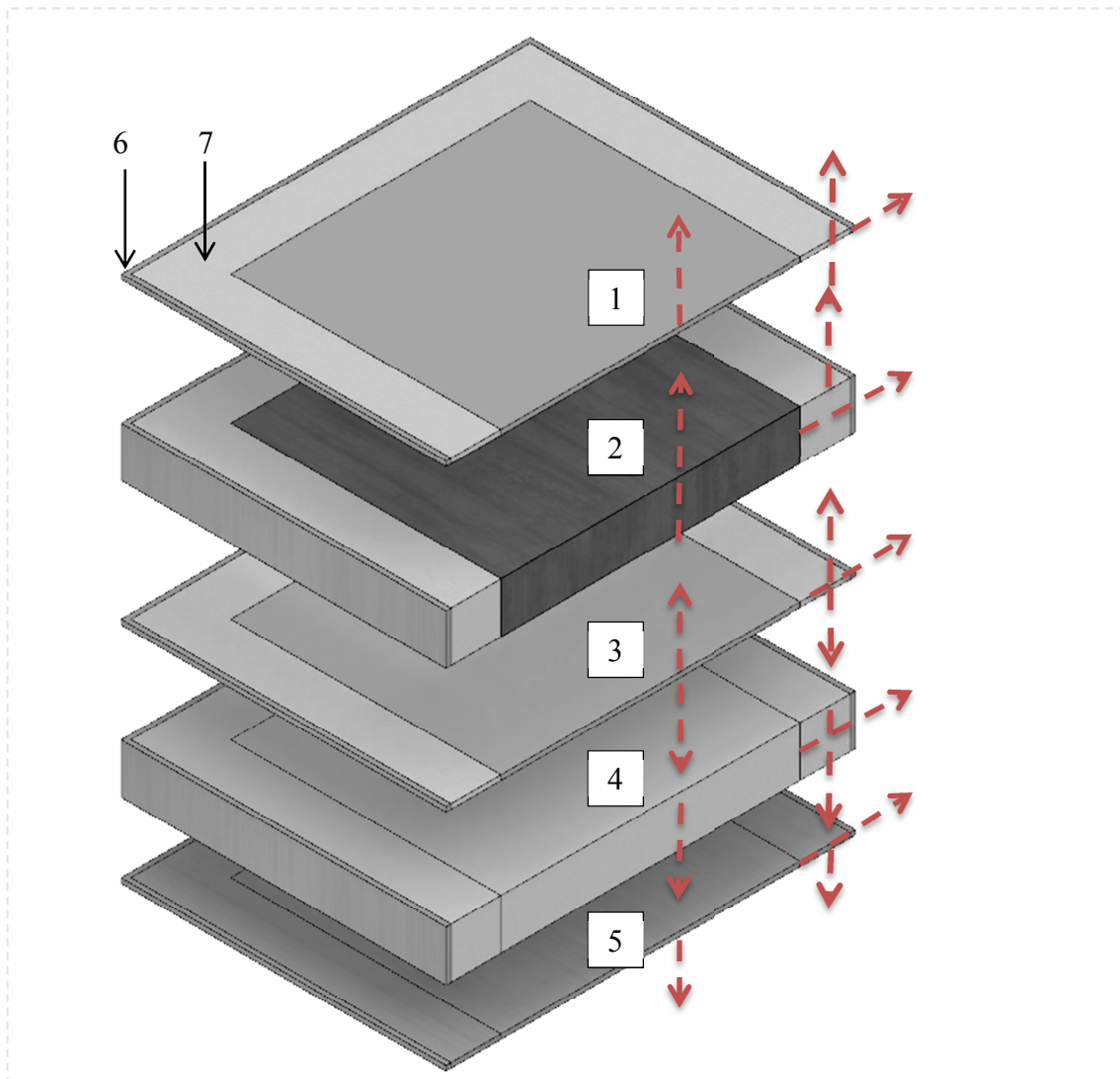
Joonis 2.1. Katsekambri kolmemõõtmelise mudeli läbilõige. 1 - puitlaastplaat (OSB) 6 mm; 2 - alumiiniumplaat 1 mm; 3 - katsekambri soojusisolatsioon (polüstüreen) 100 mm; 4 - uuritav objekt 100 mm paksusega; 5 - alumiiniumplaat 1 mm; 6 - Kapton kile (polüamiid) + küttekeha (takistustraata Kanthal) 0,3 mm; 7 - alumiiniumplaat 1 mm.

Jooniselt 2.1 on näha küttekeha mis on paigaldatud kahe alumiiniumplaadi vahele. Kahe alumiiniumplaadi kasutamine võimaldab küttekehana kasutada 0,3 mm takistustraati Kanthal mis on ühtlaselt jaotatud kogu plaadi ulatuses.

Alumiinium on väga hea soojusjuhtivusega $\lambda = 229 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ [6] ning seeläbi jaotub küttekehast tulev soojus kogu plaadi ulatuses. Takistustraati on alumiiniumist isoleeritud kuumakindla polüamiidkilega mis kannatab temperatuuri kuni $260 \text{ }^{\circ}\text{C}$ [7].

Kuumutusplaadi stabiilset temperatuuri hoitakse PI-regulaatoriga ning temperatuuri näit loetakse alumiiniumplaadi pinnale paigaldatud temperatuuri anduritelt.

Joonisel 2.2 on esitatud katsekambri läbilõige ning soojuse liikumise skeem alates küttekehast ning väljudes läbi erinevate piirete. Detailsem joonis koos Scilab Xcos keskkonnas modelleeritud simulatsiooni skeemiga on esitatud lisa A joonistel A.1. ja A.2. Modelleeritud mudeli skeemis jaotati katsekamber kuueks kihiks (vt. ka Joonis 2.2).



Joonis 2.2. Ekspressmõõduri mudelis arvesse võetud soojusvood. 1 - alumiiniumist jahutusplaat, 1 mm; 2 - uuritav materjal, 0,1 m; 3 - alumiiniumist kuumutusplaat 2 mm; 4 - polüstüreenist piire, 0,1 m; 5 - OSB-plaadist kate, 6 mm. 6 - OSB-plaadist kate, 6 mm; 7 - polüstüreenist piire, 0.1 m

Näiteks on arvestatud, et küttekehast väljub soojus vertikaalselt ülesse uuritavasse ja alla polüstüreenist piirdesse. Horisontaalselt väljub küttekehast soojus polüstüreenist külgiirettesse. Lisaks võeti arvesse ka kihtide vaheline soojusvahetust, kus soojus liigub ühest kihist teise.

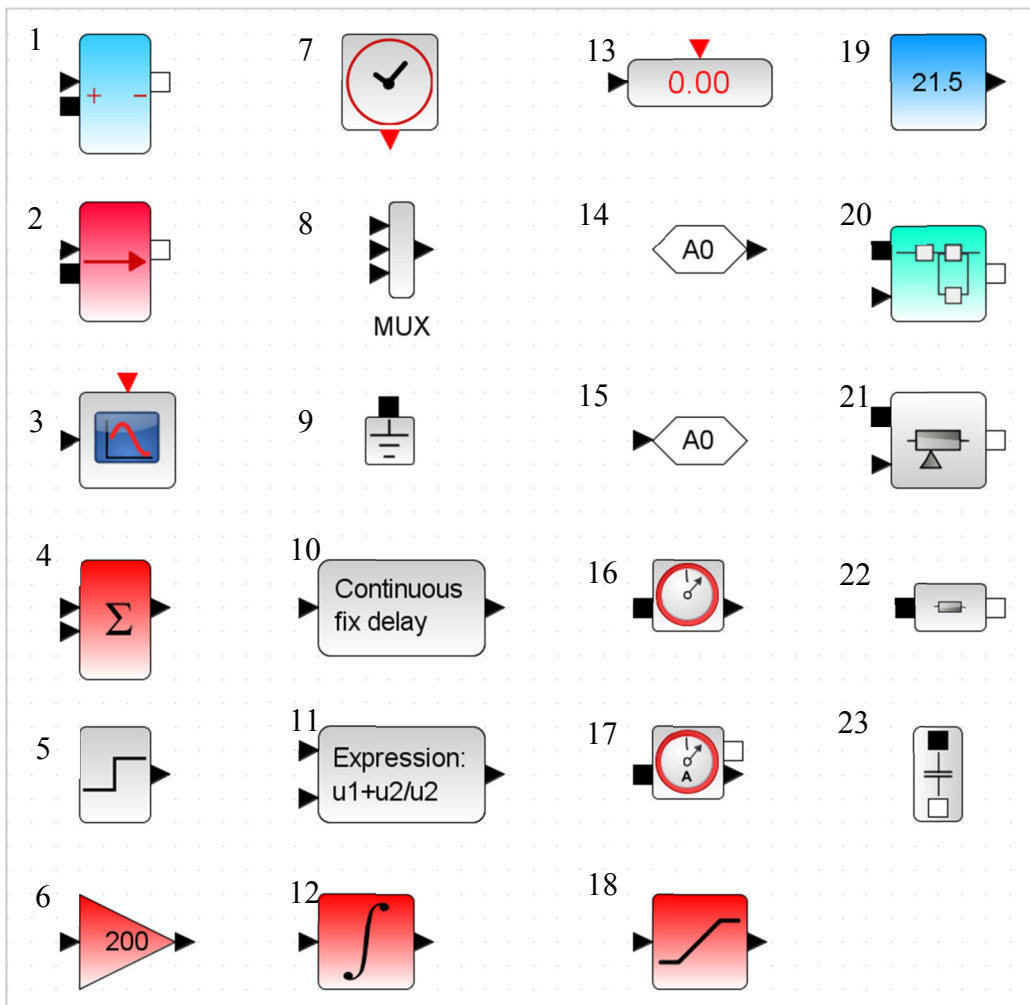
3. MATERJALI SOOJUSJUHTIVUSE EKSPRESSMÕÕTURI SIMULATSIOON KESKKONNAS SCILAB

3.1 Scilabis modelleeritud skeemi põhimõte ja sümbolid

Ekspressmõõduri töö analüüsimiseks koostati keskkonnas Scilab Xcos mudel mõõteseadme elektrilise aseseemi abil. Mudeli põhiskeem on esitatud lisas A joonisel A.1 ja koos mõõduri läbilõike ja vektorskeemiga joonisel A.2. Skeemi elementide koosseis ja superblokkide sisu on kirjeldatud alljärgnevas põhiosas. Modelleeritud mudeli lähtekood kus arvutatakse mõõduri piirete soojustakistused ja mahtuvused on esitatud lisas B. Lähtekoodis esitatud muutujad on vastavuses modelleeritud mudeli skeemil esitatud tähistega.

Joonis 3.1 on esitatud Xcos keskkonnas modelleeritud ekspressmõõduri soojuslevi kirjeldav elektrilisel aseseemil kasutatavad sümbolid.

Simulatsiooni soojuslevi põhikomponentideks on elektrilised elemendid. Alljärgnevalt kirjeldatakse kõikide mudelis kasutatavate elementide funktsioone.



Joonis 3.1. Scilab 5.5.2 skeemi sümbolid. 1 - pingallikas; 2 - vooluallikas; 3 - graafik; 4 - summaator; 5 - astmefunktsioon; 6 - võimendustegur; 7- kell; 8- multipleksor; 9 - maandus; 10 - ajaline viide; 11 - skeemisisese valemi funktsioon 12 - integraal 13 - Väärtuste tablo; 14 - signaali sisend (juhtmevaba); 15 - signaali väljund (juhtmevaba); 16 - pingeandur; 17 - vooluandur; 18 - küllastusvahemik; 19 - konstant; 20 - superblokk; 21 - muuttakisti; 22 - takisti; 23 - kondensaator [8]

Materjalide soojustakistust väljendatakse soojuslevi elektrilisel aseskeemil takistiga ja leitakse valemiga (3.3.). Õhu piirikihi soojusülekande teguri arvutamine on lahendatud modelleeritud skeemil automaatselt ning väljastatakse muuttakisti kaudu. Materjalide soojusmahtuvust väljendavad skeemil kondensaatorid ja leitakse valemiga (3.4.). [8]

Pingeallika kaudu määratakse ära välistemperatuur tänu millele tekib elektriahelas potentsiaalide vahe ning vooluallika kaudu kantakse üle materjalile võimsus.[8]

Temperatuuri näit väljastatakse pingeanduri abil ning soojusvoog vooluanduri abil, mis on jadamisi ühendatud elektriahelasse. Väärtused esitatakse väärtuste tablool või graafilisel elemendil. Väärtuste kuvamiseks simulatsiooni kestel on vaja kasutada kella elementi millega määratakse ära mõõtmise sagedus. Mitme sisendi kuvamiseks graafikul või tablool kasutatakse multipleksorit. [8]

Simulatsiooni skeemisiseste valemite sisestamiseks on olemas eraldi element. Valemite puhul kus on vaja kasutada negatiivset astmenäitajat kasutatakse astmefunktsiooni elementi mille abil on võimalik arväärtuste toimet valemis ajaliselt hilistada, vastasel korral ei lase Scilab keskkond simulatsiooni alustada. Hilistamine on võimalik ka tavalise hilistamise elemendiga mis ühendatakse jadamisi signaali ahelasse. [8]

Liitmise-lahutamise tehted tehakse summaatoriga. PI-regulaatoris on kasutusel võimendustegur mis vastavalt tegurile võimendab sisenevat signaali ning integraal mille abil toimub vastavalt ajakonstandile veasignaali summeerimine. [8]

Muutujad ja arvulised väärtused määratakse muutuja- või numbrilise väljund elemendiga. Küllastusvahemiku elemendiga määratakse ära küttekeha lubatud maksimaalne võimsus. [8]

Kuna kogu ekspressmõõtuuri skeem koosneb väga paljudest elementidest ja ühendustest siis skeemi hõrendamiseks kasutatakse superplokk-elementi mille sisse on võimalik integreerida erinevaid skeemi osasid ilma, et need kaotaksid ühendust tervikuga. [8]

Mõõteseadme skeemi põhistruktuur põhineb soojuslevi elektrilisel aseskeemil. Soojuslevi elektriline aseskeem lähtub sellest, et kui temperatuuride erinevus põhjustab soojusenergia eraldumist madalama temperatuuriga objekti suunas siis sarnaselt liiguvad elektriahela punkti suunas elektronid kõrgema potentsiaaliga elektriahela punktist madalama potentsiaaliga elektriahela punkti suunas. Sarnaselt elektrile püüab ka soojus levida madalama temperatuuriga objekti suunas mööda väiksema termilise takistusega teid.[9]

Toome võrdluseks voolutugevuse leidmise valemi Oomi seadusest. [9]

$$I = \frac{U}{R}, \quad (3.1.)$$

kus I on voolutugevus, A ;

U - pinge, V ;

R - takistus, Ω .

Ja lisaks soojusvoo valemi.[9]

$$q = \frac{\Delta T}{R_{soojus}}, \quad (3.2.)$$

kus q on soojusvoog, W ;

ΔT - temperatuuride vahe, K;

R_{soojus} - materjali soojustakistus, $(m^2 \cdot K)/W$.

Valem (3.1.) järgi sõltub vool elektriahela takistusest, ning kahe punktivahelisest potentsiaalide vahest ehk pingest. Sarnaselt sõltub soojusvoog temperatuuride vahest ning termilise takistuse jagatisest (valem 3.2.). [9]

Materjali soojustakistus leitakse valemiga [9]

$$R_{soojus} = \frac{\delta}{S \cdot \lambda}, \quad (3.3.)$$

kus δ on materjali paksus, m ;

λ - materjali soojusjuhtivus, $W/(m \cdot K)$;

S - materjali ristlõikepindala, m^2 .

Materjalide soojusmahtuvused leiti valemiga. [1: 141]

$$C = c \cdot \rho \cdot V, \quad (3.4.)$$

kus C on soojusmahtuvus, $J \cdot K^{-1}$;

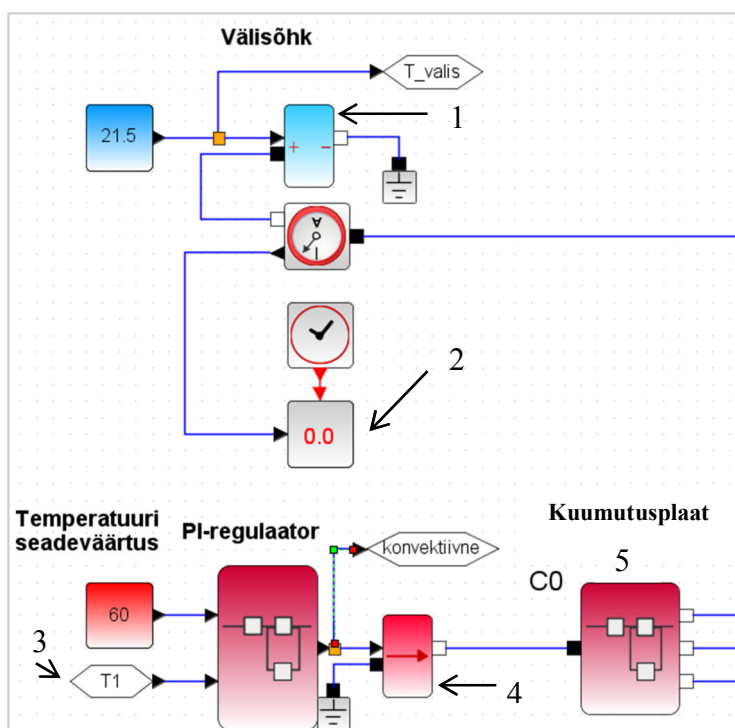
c - materjali erisoojus, $kJ/(kg \cdot K)$;

ρ - tihedus kg/m^3 ;

V - ruumala, m^3 .

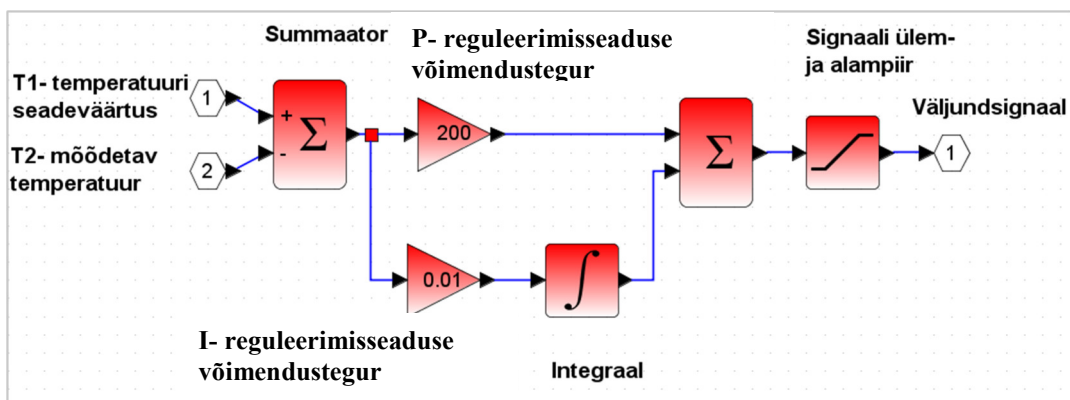
3.2 Temperatuuri reguleerimine

Scilabi-s modelleeritud skeem jaguneb struktuurilt kuueks osaks. Esimene osa koosneb vooluallikast mille kaudu kantakse läbi PI-regulaatori kuumutusplaadile võimsust, ning pingeallikast mille abil tekib elektriahelas välistemperatuuri etteandmisel potentsiaalide vahe [9]. Väljavõtted skeemist on esitatud joonistel 3.1-3.3.



Joonis 3.2. Keskkonnas Scilab Xcos kasutatud voolu- ja pingeallikas. 1- pingeallikas; 2- ekspressmõõturist väliskeskkonda väljuva soojuse tabloo; 3- kuumutusplaadi temperatuurisensori signaal; 4- vooluallikas; 5- kuumutusplaat [9]

Joonisel 3.2 esitatud PI-regulaatori superbloki sisu skeem on välja toodud joonisel 3.3.

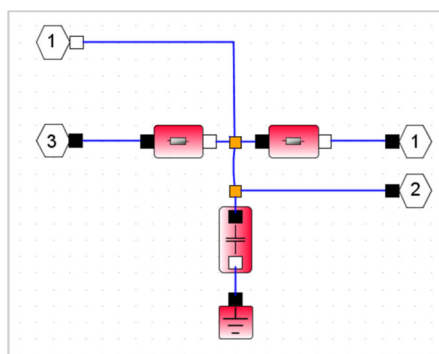


Joonis 3.3. Keskkonnas Scilab Xcos modelleeritud PI-regulaator [10, 11]

PI-regulaator (joonis 3.3) koosneb summaatorist kus määratakse ära temperatuuri seadeväärtuse ja mõõdetud temperatuuri vahe. Selleks, et reaalne kuumutusplaadi temperatuur vastaks seadeväärtusele korrutatakse leitud temperatuurivahe katseliselt määratud võimendusteguriga ning summeeritakse katseliselt leitud ajakonstandiga. Kuumutusplaadi võimsusvahemik määratakse küllastuselemendi sätetes. Modelleeritud küttekeha võimsuseks määrati katseliselt 150 W. [10, 11]

3.3 Konstruksioonelementide soojuslevi elektriline aseskeem

Mudeli teine osa võtab arvesse konstrueeritava mõõturi materjalide ja konstruksioonelementide nagu näiteks kuumutusplaat ja piirded mõju, väljavõttes skeemist on esitatud joonistel 3.4-3.6.

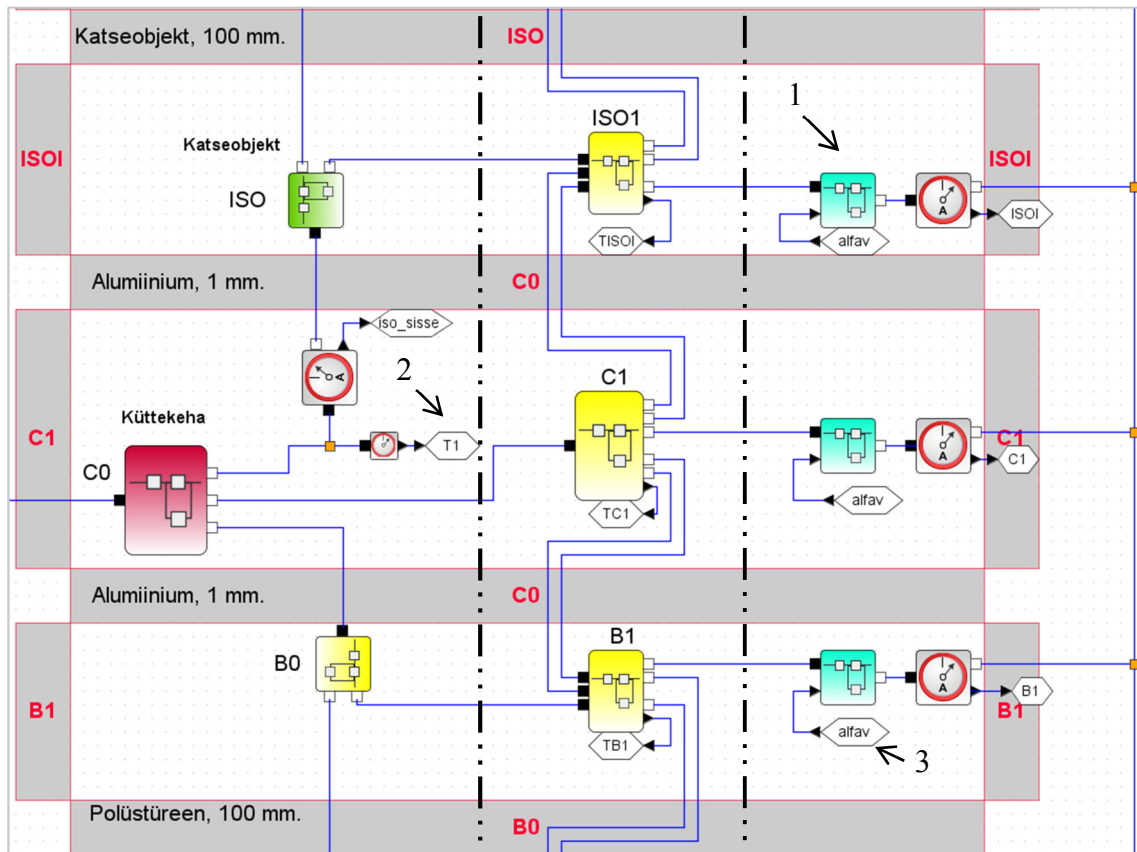


Joonis 3.4. Keskkonnas Scilab Xcos modelleeritud kuumutusplaat

Kuumutusplaat (joonis 3.4) koosneb kahest alumiiniumplaadist mille vahele on monteeritud takistustraadist küttekeha. Alumiiniumplaatide soojustakistust väljendavad kaks elektrialehasse jadamisi ühendatud takistit. Soojusmahtuvust väljendab kahe takisti

vahele ühendatud kondensaator kuhu salvestub soojus materjali keskmise temperatuuri juures.[9]

Joonisel 3.5 on esitatud mõõteseadme katseobjekti ja küttekeha vahelise soojuslevi kirjeldava elektrilise aseskeemi väljavõte.



Joonis 3.5. Keskkonnas Scilab Xcos modelleeritud väljavõtte skeemist. 1 - õhu piirikihi soojustakistus; 2 - kuumutusplaadi temperatuur; 3 - õhupiirikihi vertikaalpinna soojusülekanDETegur

Joonis 3.5 esitatud skeem modelleeriti kasutades superplokket, et mõõturi mudeli üldstruktuur oleks võimalikult kompaktne ja arusaadav. Skeem on jaotatud vertikaalsete katkendjoontega kolmeks osaks. Vasakul -kuumutusplaad millelt levib soojus y-telje sihis ülesse läbi uuritava materjali ja alla läbi polüstüreenist piirde. Kesk- mõõturit ümbritsev vertikaalne piire ja kihtidevaheline soojustakistus. Paremal- õhupiirikihi soojustakistus. Joonisel 3.6 on esitatud kuumutusplaadi kihi ja teda x-telje sihis ümbritseva piirde soojuslevi kirjeldava mudeli elektriline aseskeem mis vastab joonisel 3.5 esitatud skeemil superbloki (C0) sisule.

Vastavalt tulemustele leiti materjali tehnilises dokumentatsioonis ja mõõdetud soojusjuhtivuse erinevus protsentides valemiga

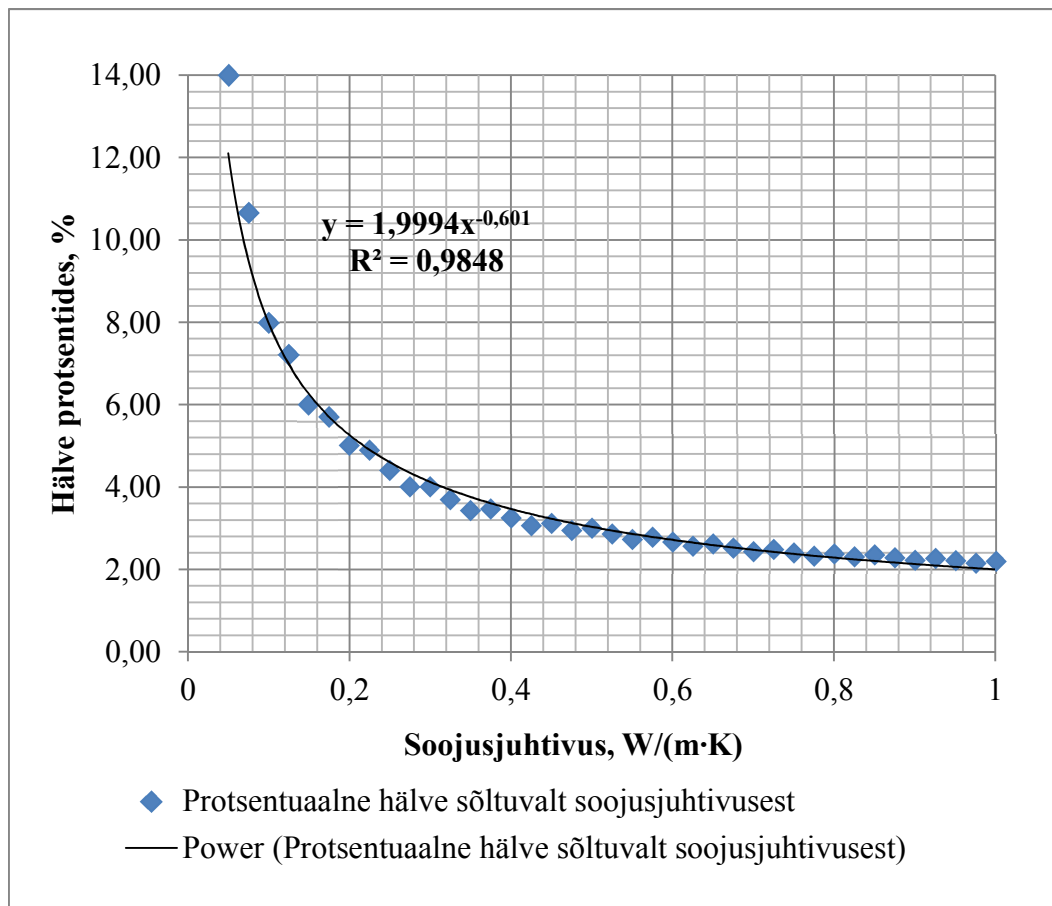
$$x_{\%} = \frac{(\lambda_{mõõd} \cdot 100)}{\lambda_{dok}}, \quad (3.4.)$$

kus $x_{\%}$ on mõõdetulemuse hälve protsentides, % ;

$\lambda_{mõõd}$ - mõõdetud materjali soojusjuhtivus, W/(m·K) ;

λ_{dok} - materjali dokumentatsioonis esitatud soojusjuhtivus, W/(m·K).

Tulemused on esitatud graafikul joonis 3.6.



Joonis 3.7. Mõõdetud ja materjali dokumentides esitatud soojusjuhtivuse vaheline erinevuse protsentides

Joonis 3.7 graafikult on näha, et mida väiksem on materjali soojusjuhtivus, seda suurem on protsentuaalne hälve. Determinatsioonikordaja $R^2 = 0,9848$ puhul võib järeldada, et trendijoone järgi on võimalik prognoosida 98,48 % täpsusega materjali soojusjuhtivust simulatsiooni protsessi tulemuste abil.

Hälbe vähendamiseks võeti graafikult (joonis 3.7) mõõdetud ja materjali tehnilises dokumentatsioonis esitatud soojusjuhtivuse vahelise protsentides esitatud hälbe astendustrendijoone funktsiooni $y = 1,9994 \cdot x^{-0,601}$ mille järgi leiti arvutuslik soojusjuhtivus valemiga

$$\lambda_{arvutuslik} = \left(1 + \frac{1,9994 \cdot \lambda_{mõõdt}^{-0,601}}{100} \right) \cdot \lambda_{mõõdt}, \quad (3.5.)$$

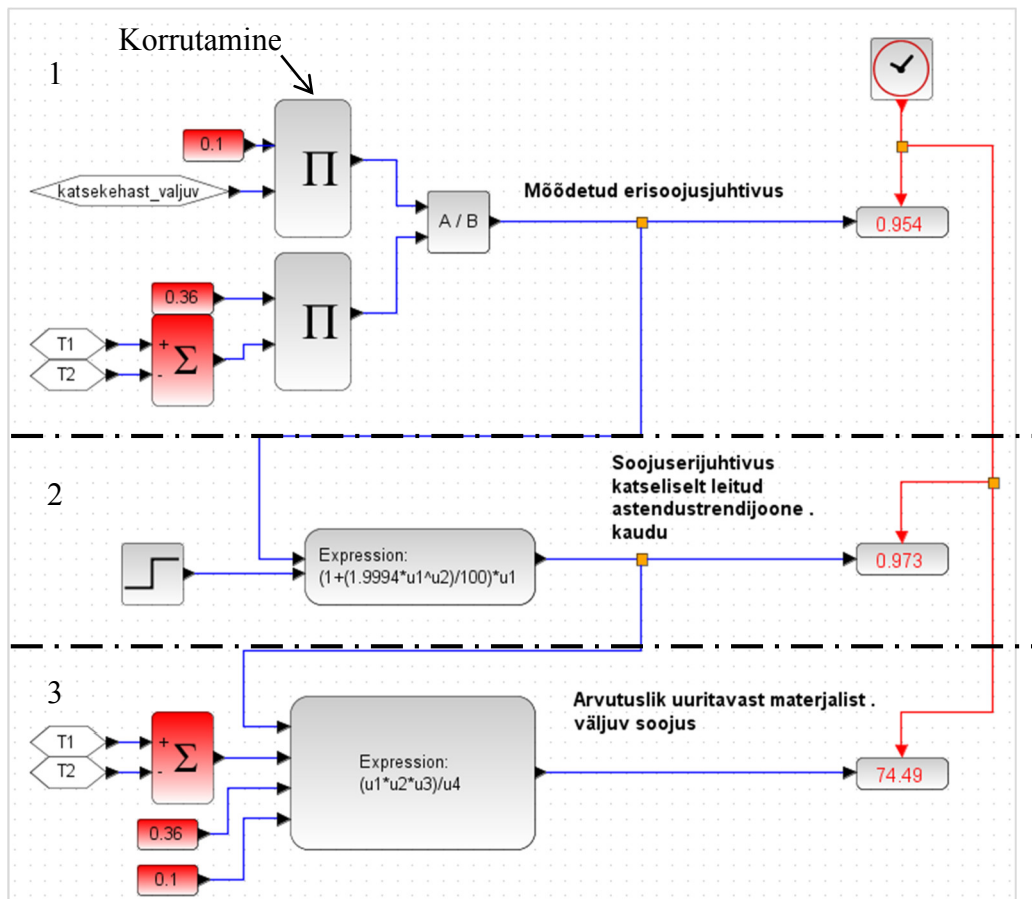
kus $\lambda_{arvutuslik}$ on arvutuslik soojusjuhtivus, W/(m·K);

$\lambda_{mõõdt}$ - mudeli abil määratud soojusjuhtivus, W/(m·K).

Uuritavast materjalist väljuv soojusvoog leiti arvutuslikult vastavalt valemile (1.1) [1: 2]

$$q = \frac{\lambda_{arvutuslik} \cdot \Delta T \cdot S}{\delta}, \quad (3.6.)$$

Scilabis modelleeritud soojusjuhtivuse arvutamise skeem on esitatud joonisel 3.8

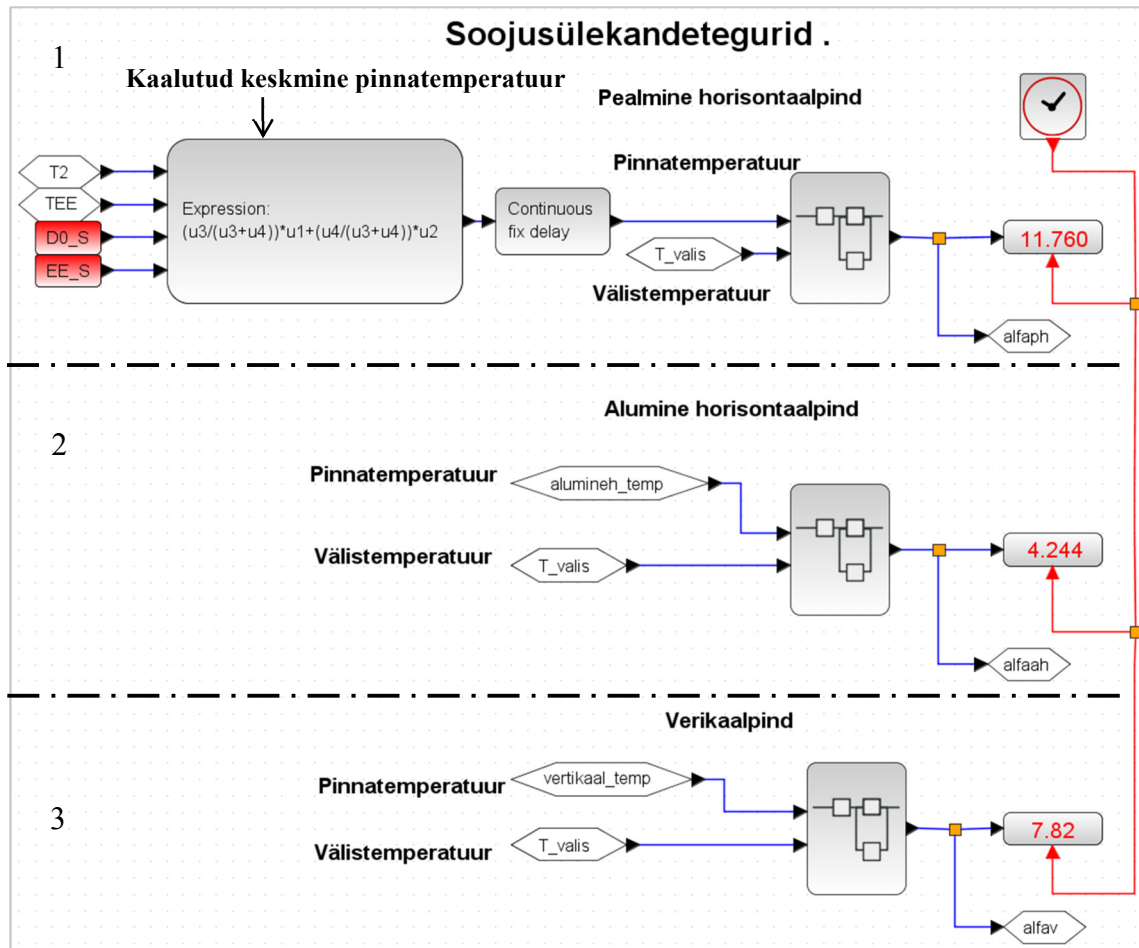


Joonis 3.8. Soojusjuhtivuse arvutamine keskkonnas Scilab Xcos. 1 - Mõõdetud soojusjuhtivuse arvutamine; 2 - soojusjuhtivuse leidmine astendustrendi joone kaudu; 3 - Uuritavast materjalist arvutuslik väljuv soojus

Joonis 3.8 esitatud skeem on jaotatud katkendjoontega kolmeks, esimeses osas leitakse soojusjuhtivus läbi mõõtetulemuste vastavalt valemile (1.1.). Teises osas leitakse soojusjuhtivus vastavalt katseliselt leitud astendustrendi joone funktsiooni järgi valemiga (3.5.). Kolmandas osas leitakse uuritavast materjalist väljuv soojus valemiga (3.6.).

3.5 Konvektiivse soojuslevi arvutamine

Neljas osa koosneb konvektiivse soojuslevi arvutamisest kus leitakse õhu piirikihi soojusülekandevegur. Modelleeritud skeem on esitatud joonisel 3.9.

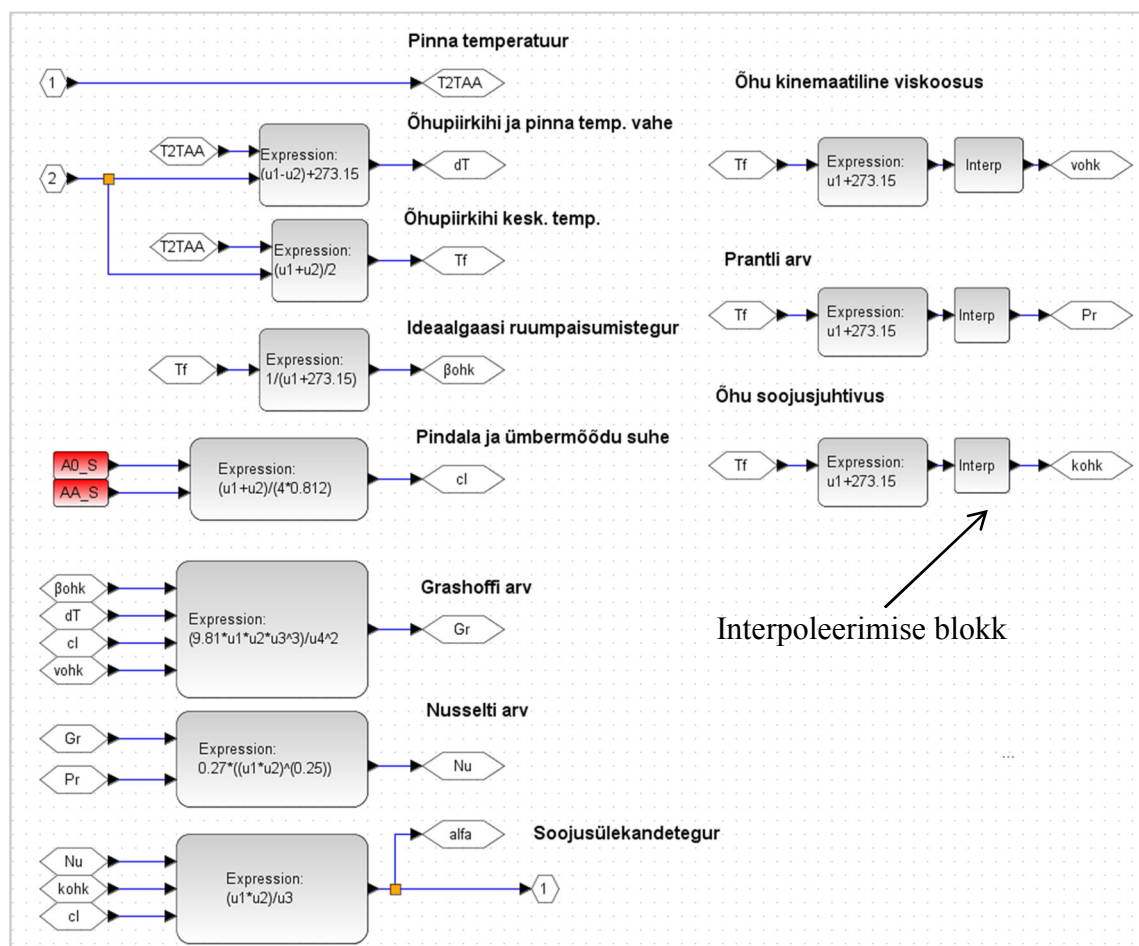


Joonis 3.9. Õhu piirikihi soojusülekandeveguri leidmine. 1 - Soojusülekandeveguri arvutamine pealmisel horisontaalpinnal; 2 - Soojusülekandeveguri arvutamine alumisel horisontaalpinnal; 3 - Soojusülekandeveguri arvutamine vertikaalpinnal

Joonis 3.9 esitatud pindade õhupiirikihi soojusülekandeveguri arvutamise skeem põhineb valemitel (3.7. - 3.18.) ning superploki sisu on esitatud joonisel 3.10. Skeem on jagatud katkendjoontega kolmeks osaks: peamine horisontaalpind, alumine horisontaalpind ja vertikaalpind.

Konvektiivne soojusvahetus tekkitab gaaside kokkupuutel tahke aine pinnaga ning eeldusel, et tahkel ainel ja gaasil on erinevad temperatuurid. Vabakonveksioonis põhjustab gaaside liikumist gaasi soojenemisest tulenev paisumine ja tiheduse vähenemine. Antud liikumise intensiivsust iseloomustab Grashofi sarnasusarv. [12]

Konstrueeritav katsekamber asetatakse põrandapinnast 0,7 m kõrgusele kolmele tugijalale, seega on kõik pinnad avatud konvektiivsele soojusvahetusele. Vabakonveksiooni soojusülekande tegur leitakse eraldi horisontaalse alumise-, horisontaalse pealmise- ja vertikaalse pinna kohta.



Joonis 3.10. Õhu piirikihi konvektiivse soojusülekande teguri arvutamise mudeli skeem

Joonisel 3.10 esitatud skeemil leitakse konvektiivne soojusülekande tegur terve simulatsiooni kestel sõltuvalt temperatuuridest ning õhu füüsikalistest omadustest.

Õhu füüsikalised omadused nagu kinemaatiline viskoossus, Prandtl arv ja õhu soojusjuhtivus määratakse interpoleerimise plokkides mis väljastavad väärtused vastavalt

õhupiirikihi keskmisele temperatuurile. Kuiva õhu füüsikalised omadused on saadud lisas F esitatud tabelist.[1]

Vabakonveksiooni soojusülekandevegur leiti pealmise ja alumise horisontaalpinna korral valemiga [1: 327-362]

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{cl}, \quad (3.7.)$$

kus α on vabakonveksiooni soojusülekandevegur, W/(m²·K),
 Nu - Nusselti arv;
 λ - õhu soojusjuhtivus vastavalt temperatuurile, W/(m·K);
 cl - pindala ja ümbermõõdu suhe.

Vertikaalpinna vabakonveksiooni soojusülekandevegur leiti valemiga [1: 327-362]

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{H}, \quad (3.8.)$$

kus H on vertikaalpinna kõrgus, m,

Vabakonveksiooni soojusülekandeveguri leidmiseks arvutati õhu piirikihi keskmine temperatuur valemiga [1: 333]

$$T_f = \frac{T_\infty + T_w}{2}, \quad (3.9.)$$

kus T_f on õhu piirikihi keskmine temperatuur, °C,
 T_∞ - mõõduri pinna temperatuur, °C;
 T_w - ruumi õhu temperatuur, °C.

Ideaalgaasi termiline ruumpaisumistegur leiti valemiga [1: 327-362]

$$\beta_{\delta hk} = \frac{1}{T_f}, \quad (3.11.)$$

kus $\beta_{\delta hk}$ on ideaalgaasi ruumpaisumistegur, K.

Pindala ja übermõõdu suhe cl (*characteristic lenght*) leiti valemiga [1: 327-362]

$$cl = \frac{a \cdot b}{2 \cdot (a + b)}, \quad (3.12.)$$

kus a on pikkus, m,
 b - laius, m;

Pealmise horisontaalpinna Nusselti arvu määramiseks kasutati vastavalt Grashofi ja Prandtl'i arvu korrutise $Ra = Gr \cdot Pr$ tulemusena valemmeid [1: 327-362]

$$2 \cdot 10^4 \leq Ra \leq 8 \cdot 10^6, \text{ siis } Nu = 0.54 \cdot (Gr \cdot Pr)^{\frac{1}{4}} \quad (3.13.)$$

$$2 \cdot 10^6 \leq Ra \leq 10^{11}, \text{ siis } Nu = 0.15 \cdot (Gr \cdot Pr)^{\frac{1}{3}} \quad (3.14.)$$

kus Nu on Nusselti arv,
 Gr - Grashofi arv;
 Pr - Prandtl'i arv.

Prandtl'i arv väljendab voolava keskkonna füüsikalisi omadusi ning see leiti lisas F esitatud tabelist.

Alumise horisontaalpinna Nusselti arv leiti tingimusel, et $10^9 \leq Ra \leq 10^{13}$ valemiga [1: 327-362]

$$Nu = 0,27 \cdot (Gr \cdot Pr)^{\frac{1}{3}} \quad (3.15.)$$

Vertikaalpinna Nusselti arv leiti tingimusel, et $10^9 \leq Ra \leq 10^{13}$ valemiga [1: 327-362]

$$Nu = 0.10 \cdot (Gr \cdot Pr)^{\frac{1}{3}} \quad (3.16.)$$

Grashoffi arv väljendab tõstejõudu tulenevalt temperatuuride vahest ning leiti horisontaalpindade puhul valemiga [1: 327-362]

$$Gr = \frac{g \cdot \beta_{\delta hk} \cdot \Delta t \cdot c l^3}{\nu_{\delta hk}^2}, \quad (3.17.)$$

kus G on Grashofi arv ,

g - maa raskuskiirendus, 9.81 m/s^2 ;

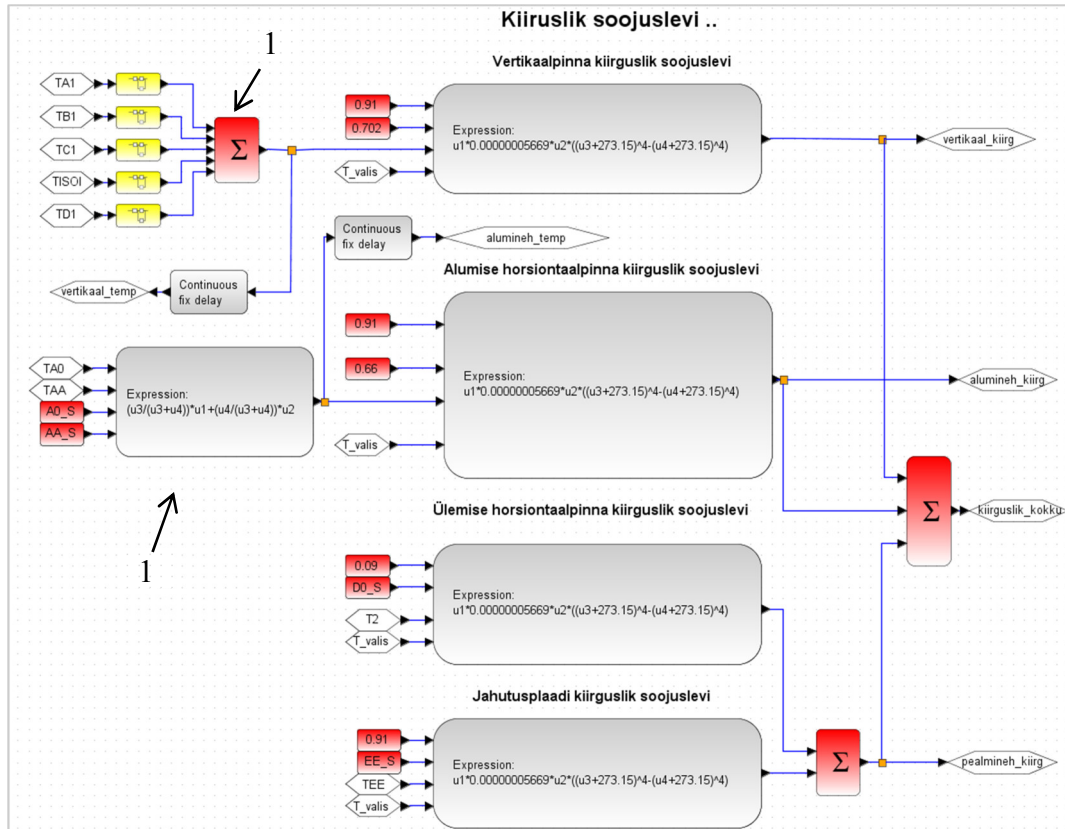
$\nu_{\delta hk}$ - õhu kinemaatiline viskoossus vastavalt temperatuurile T_f , m^2/s ,

Vertikaal pinna puhul leiti Grashofi arv valemiga [1: 327-362]

$$Gr = \frac{g \cdot \beta_{\delta hk} \cdot \Delta T \cdot H^3}{\nu_{\delta hk}^2}, \quad (3.18.)$$

3.6 Kiirguslik soojuslevi

Mudeli viies osa koosneb kiirgusliku soojusvoo arvutamisest. Scilabis modelleeritud kiirgusliku soojusvoo arvutamise skeem on esitatud joonisel 3.11.



Joonis 3.11. Kiirgusliku soojuslevi arvutamine. 1 - pindade kaalutud keskmine temperatuur

Kiirguslik soojuslevi võimsus leiti valemiga [1: 412]

$$q = e \cdot \sigma \cdot S \cdot (T_p^4 - T_v^4), \quad (3.19.)$$

kus q on kiirguslik soojuslevi võimsus, W ;

σ - Stefan-Boltzmanni absoluutselt musta keha kiirgustegur;
 $5.669 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ [1];

S - pindala, m^2 ;

T_p - pinna temperatuur, K ;

T_v - ümbritsevate pindade temperatuur, ruumitemperatuur, K;

e - materjali kiirgustegur.

3.7 Scilabis ja Fusion 360-nes modelleeritud simulatsiooni tulemused

Mudeli kuuendas osas esitatakse simulatsiooni tulemused. Modelleeritud ekspressmõõturis mõõdetavate soojusisolatsiooni materjalide soojusfüüsikalised omadused on esitatud tabelis 3.1. Samade materjalide mõõtmised teostatakse ka konstrueeritud ekspressmõõturiga. Simulatsiooni tulemuste abil on võimalik leida mõõtmisprotsesside ajalised kestvused ning hinnata konstrueeritava mõõturi sobiliku kuumutusplaadi võimsuse valikut.

Tabel 3.1. Mõõdetavate materjalide soojusfüüsikalised omadused [13,14]

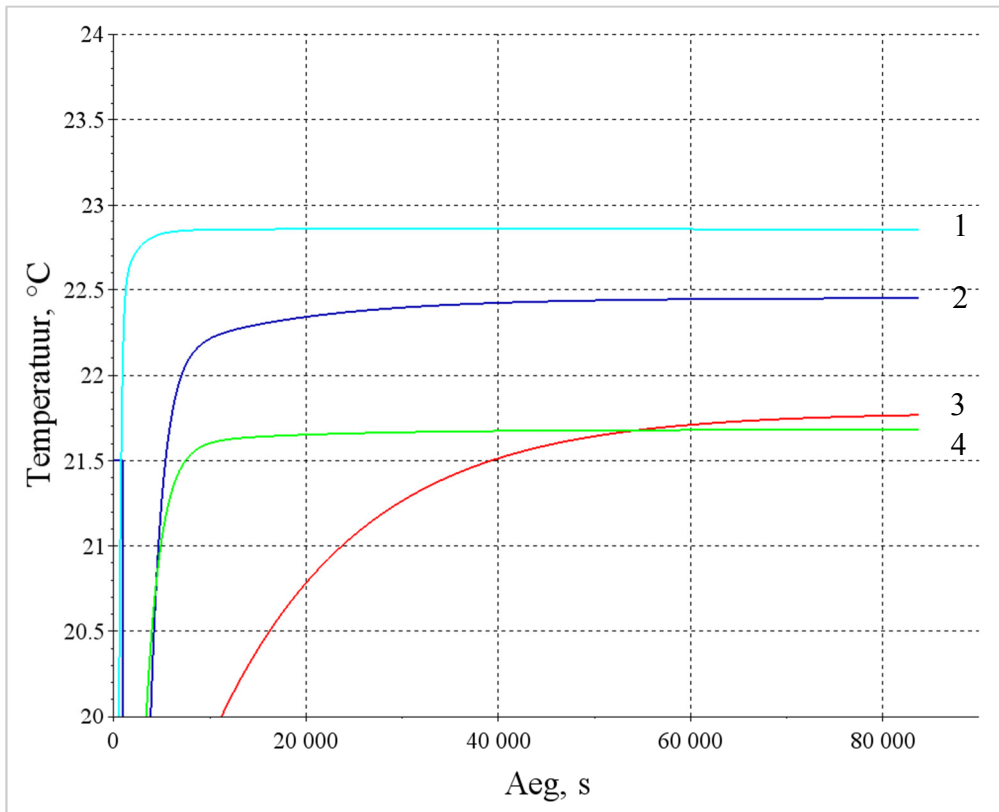
Materjal		Soojusjuhtivus, $W/(m \cdot K)$	Erisoojus, $J/(kg \cdot K)$	Tihedus, kg/m^3
Nr.1	puitkiudplaat <i>Skano</i>	0,05	2720	240
Nr.2	boorbetonplaat Bauroc Element	0,11	1500	475
Nr.3	Saepurusoojustus (kustutatud lubi, liiv)	?	-	?

Tabelis 3.1 esitatud saepurusoojustuse soojusjuhtivus mõõdeti konstrueeritud mõõturiga. Kuna materjal oli esialgu tundmatu soojusjuhtivusega siis viidi selle asemel läbi simulatsioon materjaliga mille soojusjuhtivuseks on $1 W/(m \cdot K)$ eeldades, et saepurusoojustuse soojusjuhtivus jääb vahemiku $0,05-1 W/(m \cdot K)$. Välistemperatuuriks määrati $21.5 ^\circ C$ ja kuumutusplaadi temperatuuri seadeväärtuseks $60 ^\circ C$.

Simulatsiooni tulemused on esitatud joonistel 3.12-3.13 ja lisades joonistel C.1-C.4.

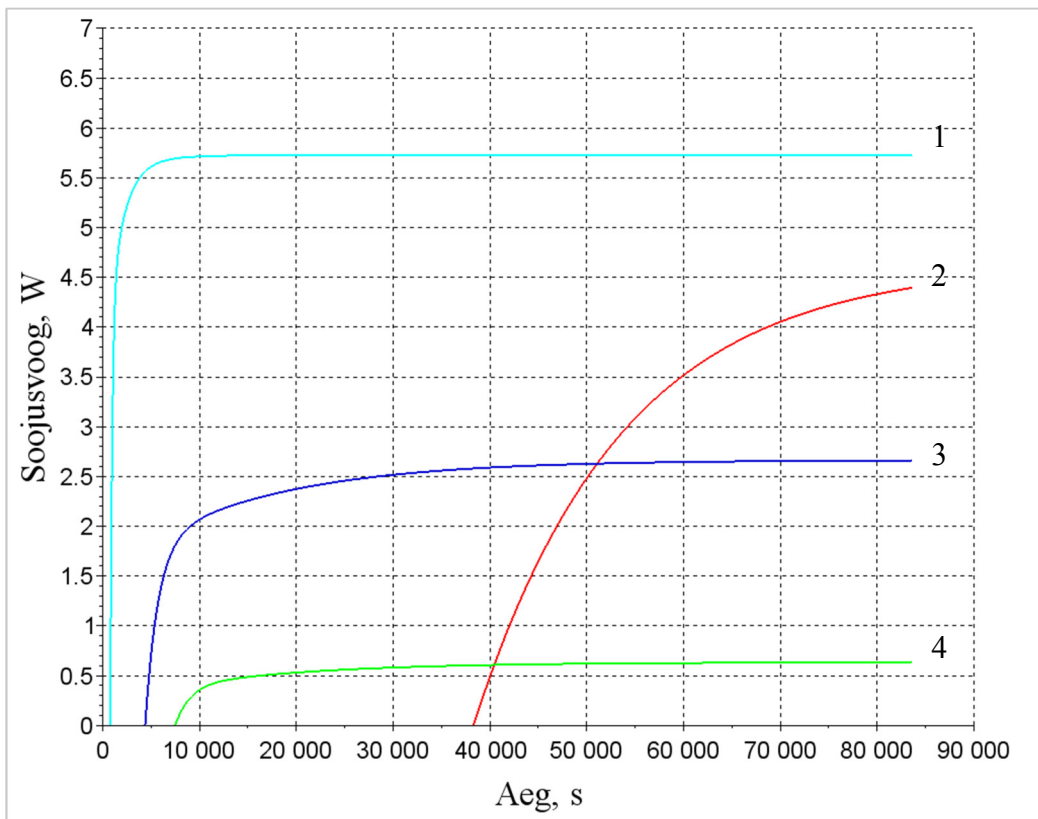
Lisaks viidi läbi samadel tingimustel simulatsioon keskkonnas Fusion 360 modelleeritud mõõturiga (joonis 3.14, 3.15 ja lisa D joonis D.1-D.4). Lähteandmetena kasutati Scilabis arvatud tulemusi.

Mõlema simulatsiooni tulemuste kokkuvõte on esitatud tabelis 3.2.



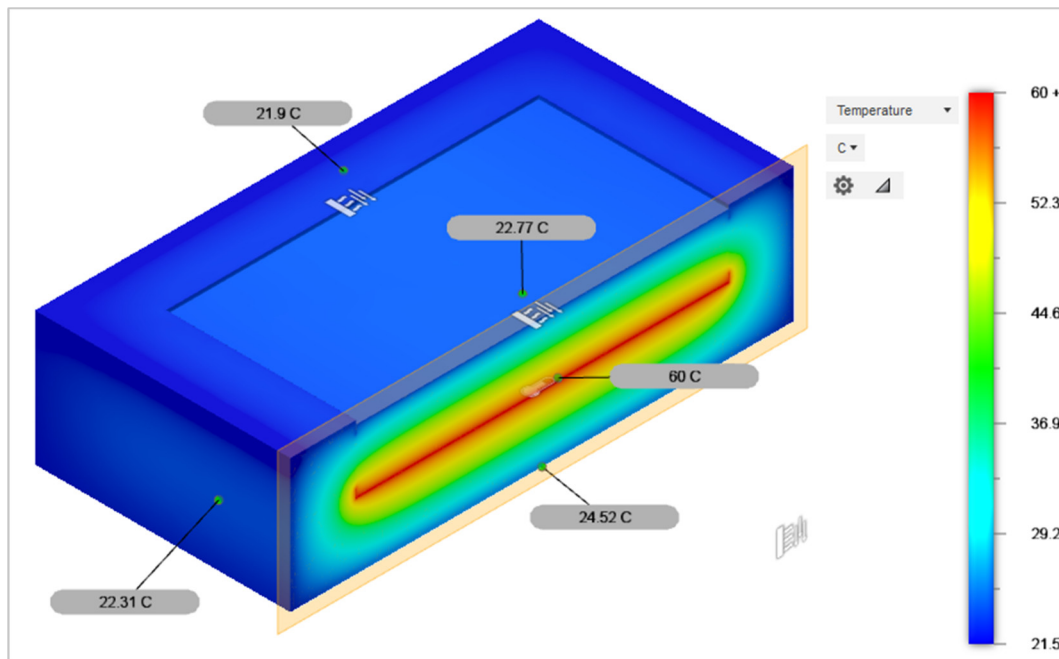
Joonis 3.12. Scilabis modelleeritud materjali soojusjuhtivuse ekspressmõõduri soojuslevi simulatsioon, uuritava objekti soojusjuhtivus $0,05 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, temperatuur. 1 - uuritava materjali pealmise pinna temperatuur (T_2); 2 - alumise horisontaalpinna kaalutud keskmine temperatuur; 3 - vertikaalpinna kaalutud keskmine temperatuur; 4 - pealmise horisontaalpinna ääre temperatuur.

Jooniselt 3.10 on näha, et kõige kõrgem temperatuur on uuritava materjali pinnal ja kõige madalam temperatuur vertikaalpinnal ja pealmise horisontaalpinna äärmisel alal. Kui vertikaalpinna soojenemiseks kulub umbes 24 tundi siis ülejäänud pindades hakkab temperatuur stabiliseeruma umbes 10 tunniga.



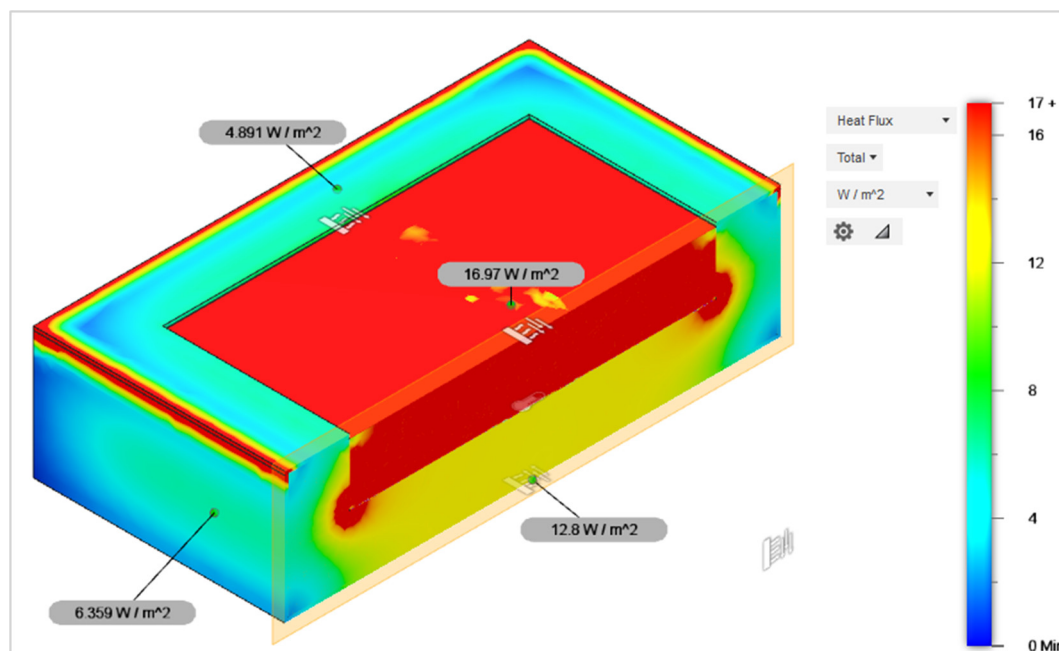
Joonis 3.13. Scilabis modelleeritud soojusjuhtivuse ekspressmõõduri soojuslevi simulatsioon, uuritava objekti soojusjuhtivus $0,05 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, soojusvoog. 1- uuritavast materjalist väljuv soojusvoog; 2- vertikaalpinnast väljuv soojusvoog; 3- alumisest horisontaalpinnast väljuv soojusvoog; 4- pealmise horisontaalpinna äärest väljuv soojusvoog

Jooniselt 3.11 on näha, et kõige rohkem väljub soojust uuritavast materjalist ning kõige vähem alumise horisontaalpinna ja pealmise horisontaalpinna äärmisel alalt. Kui vertikaalpinna soojusvoo stabiliseerumiseks kulub umbes 24 tundi siis ülejäänud pindades hakkab soojusvoo stabiliseeruma umbes 10 tunniga.



Joonis 3.14. Temperatuurivälja modelleerimise tulemused keskkonnas Fusion 360, uuritava objekti soojusjuhtivus $0,05 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

Joonisel 3.14 esitatud ekspressmõõduri läbilõikelt on näha, et kõige kõrgema temperatuuriga on alumine horisontaalpind ja uuritava materjali pind. Hästi on jälgitavad ka temperatuurid ekspressmõõduri sees.



Joonis 3.15. Soojusvoo jaotuse modelleerimise tulemused keskkonnas Fusion 360, uuritava objekti soojusjuhtivus $0,05 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

Joonis 3.15 esitatud ekspressmõõduri läbilõikelt on näha, et kõige rohkem väljub soojust uuritavast materjalist. Suur osa soojusest väljub ka alumisest horisontaalpinnast. Ekspressmõõduri ülemise ääre juures on programmi poolt tekitatud anomaalia mille võib arvestamata jätta.

Tabel 3.2. Simulatsioonide tulemused, tabelis 3.1 kirjeldatud materjalide kohta

	Scilab Xcos			Fusion 360		
Materjal	Nr.1	Nr.2	Nr.3	Nr.1	Nr.2	Nr.3
Soojusjuhtivus, W/(m·K)	0,05	0,11	1	0,05	0,11	1
Uuritava materjali pinna temperatuur, °C	22,8 5	24,6	39,0	22,7	24,4	38,7
Pealmise horisontaalpinna äärmise ala temperatuur, °C	21,6 8	21,7	21,8	21,9	21,9	22,3
Vertikaalpinna temperatuur, °C	21,7 8	21,8	21,8	22,3	22,3	22,4
Alumise horisontaalpinna temperatuur, °C	22,4 5	22,5	21,78	24,5	24,5	24,5
Uuritavast materjalist väljuv soojusvoog, W	5,72	12,94	74,02	6,11	14,07	76,68
Pealmiselt horisontaalpinna äärmiselt alalt väljuv soojusvoog, W	0,63	0,7	0,98	1,46	1,7	3,27
Vertikaalpinnalt väljuv soojusvoog, W	4,63	4,81	5,50	4,44	4,57	5,11
Alumiselt horisontaalpinnalt väljuv soojusvoog, W	2,66	2,67	2,71	8,44	8,44	8,44
Pealmise horisontaalpinna soojusülekandevadegur, W/(m²·K)	11,7 3	11,74	11,76	-		
Vertikaalpinna soojusülekandevadegur, W/(m²·K)	7,82	7,82	7,82			
Alumise horisontaalpinna soojusülekandevadegur, W/(m²·K)	4,24	4,24	4,24			
Uuritava materjali kiirguslik soojuslevi, W	0,26	0,58	3,59			
Pealmise horisontaalpinna äärmise ala kiirguslik soojuslevi, W	0,29	0,32	0,44			
Vertikaalpinna kiirguslik soojuslevi, W	1,04	1,08	1,24			
Alumiselt horisontaalpinna kiirguslik soojuslevi, W	3,33	3,35	3,39			

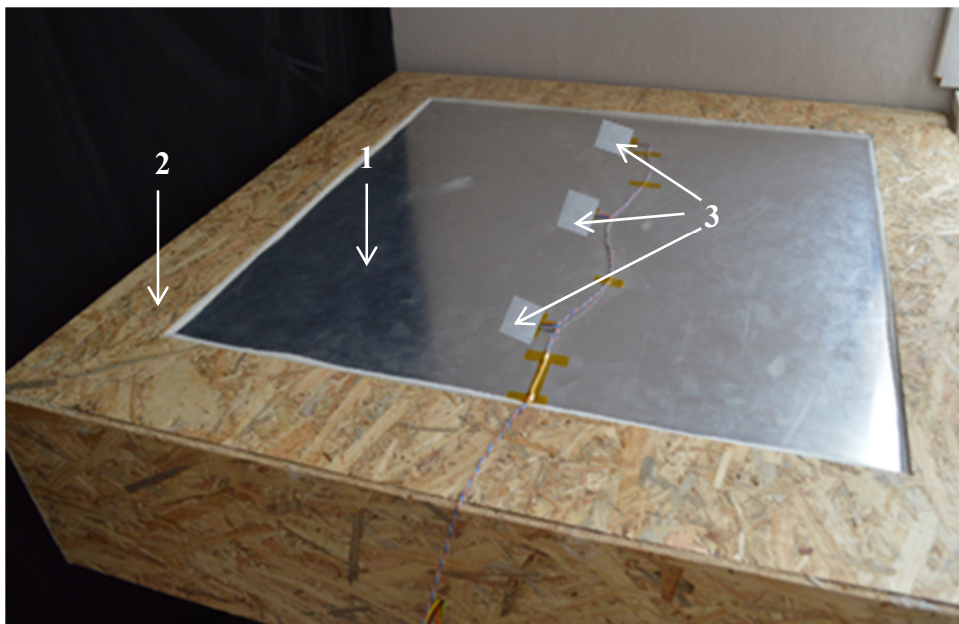
Tabel 3.2 esitatud Scilab ja Fusion 360 simulatsioonide tulemused tabelis 3.1 kirjeldatud materjalide kohta ei erine olulisel määral üksteisest. Suurim erinevus oli alumise horisontaalpinna temperatuuri ja soojusvoo puhul.

Fusion 360 simulatsiooni tulemused olid soojusvoo puhul püsivalt suuremad. See võib olla põhjustatud sellest, et juurde on arvestatud ka kiirguslik soojuslevi. Fusion 360 programmiga on võimalus võrdlemisi lihtsalt luua soojuslevi simulatsioone lõplike elementide meetodil ning saadud tulemuste põhjal saada ettekujutus soojuslevist modelleeritud mudelites. Scilabi eeliseks on mudeli koostaja poolt modelleeritud soojuslevi seaduspärasid arvesse võttev mudel ning seeläbi ka simuleerimisprotsessi arusaadavus. Lisaks on võimalik jälgida soojusvahetuse protsessi kulgu ajas.

4. KONSTRUEERIMINE

4.1 Mõõtekamber

Mõõtmiskambrisse mahub uuritav materjal pindalaga $0,36 \text{ m}^2$ ja paksusega $0,1 \text{ m}$. Soojust isoleeriva piirdena kasutati $0,1 \text{ m}$ paksust polüstüreenplaati EPS100. Konstruktsiooni tugevdamiseks ja võimalike deformatsioonide vältimiseks kaeti mõõtekamber 6 mm paksuse *OSB* plaadiga. Konstrueeritud mõõtekambri foto on esitatud joonisel 4.1.



Joonis 4.1. Mõõtekamber. 1 – alumiiniumist katteplaat; 2 - tihend; 3 - temperatuurisensorid DS18B20, kaetud alumiiniumteibiga

Joonisel 4.1 on näha alumiiniumist katteplaati kuhu on monteeritud termoliimiga kolm DS18B20 temperatuurisensorit millega mõõdetakse temperatuur T_2 . Sensorid on kaeti alumiiniumteibiga, et vältida ruumis levivat kiirgusliku soojust. Lisaks paigaldati sensorid pealmise horisontaalpinna äärde *OSB* plaadile, vertikaalpinna, alumisele horisontaalpinna ning väliskeskkonna temperatuuri mõõtmiseks $0,5 \text{ m}$ kaugusele mõõtekambrist.

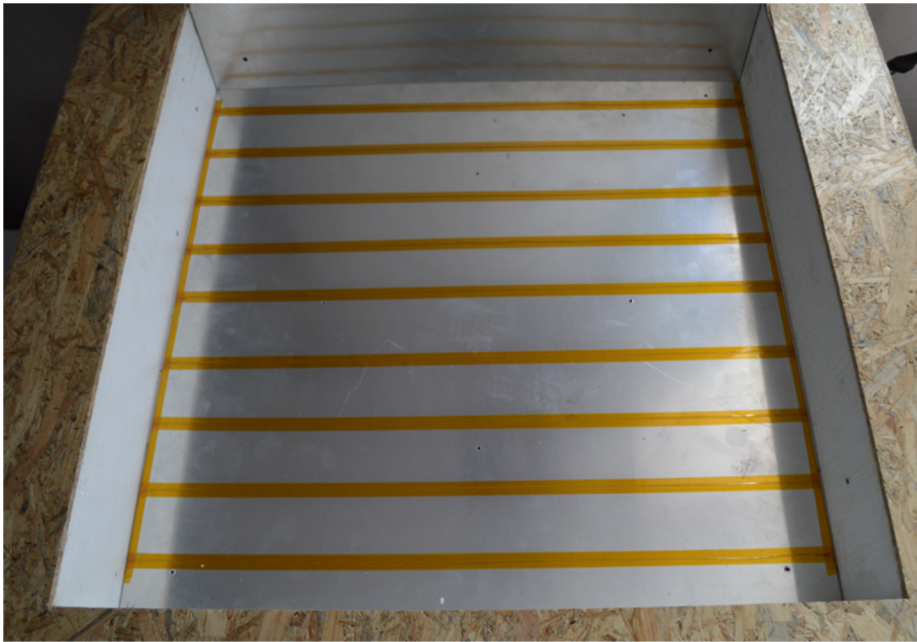
4.2 Kuumutusplaat

Kuumutusplaat konstrueeriti võttes arvesse Scilabi keskkonnas modelleeritud mudelit ja polüstüreeni füüsikalisi omadusi sõltuvalt temperatuurist. Polüstüreeni sulamispunkt algab 210 °C juures kuid alates 95 °C materjal pehmeneb ning survele üle 0.45 MPa deformeerub [15].

Kuumutusplaadi maksimaalseks temperatuuriks arvestati tulenevalt polüstüreeni pehmenemisest 80 °C. Lisas temperatuurile määrati kuumutusplaadi küttekeha võimsus sõltuvalt simulatsiooni tulemustest olukorras kui mõõdetakse materjali mille soojusjuhtivus $\lambda = 0,05 \dots 1 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$. Suurema soojusjuhtivusega kehade soojendamisel väljub rohkem energiat. Näiteks simulatsiooni järgi soojendatakse soojusjuhtivusega $1 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ katsekeha temperatuuride stabiliseerumisel 80 °C küttekehaga 126 W võimsuse juures, arvestades, et välistemperatuur on 20 °C.

Küttekeha võimsus määrab ära ka soojendamiseks kuluva aja. Näiteks kui katsekehaks on klaas soojusjuhtivusega $\lambda = 1 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, erisoojusega $c = 800 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$ ja tihedusega 2600 kg/m^3 siis 150 W võimsusega kuumutusplaadi 80 °C soojenemiseks kulub aega 56 minutit, arvestades, et väliskeskkonna temperatuur on 20 °C [16]. Mõõtmistulemuste saamiseks kulub simulatsiooni järgi umbes 20 tundi, ning kuumutusplaadi võimsus simulatsiooni lõpul on 140 W.

Küttekehana kasutati takistustraati *Kanthal* (*Fe-Cr-Al*) ristlõikega 0,3 mm ja takistusega $19,1 \Omega$. [17] Projekteeritava küttekeha maksimaalne võimsus määrati tulenevalt toiteploki 360 W nimivõimsusest. Joonisel 4.2 on esitatud küttekeha paigaldusviis.



Joonis 4.2. Takistustraadi paigutus kuumutusplaadi sees

Takistustraati paigaldati 9 reana ja 0.06 m vahega.

Küttekeha võimsus leiti tulenevalt takistustraati läbivast voolust ja kasutatavast pingest. Voolutugevuse leidmiseks kasutati voolusensorit INA219 mille näit fikseeriti kontrollerris.

Voolusensori maksimaalseks mõõdetavaks vooluks on tootja andmetel 3.2 A [18]. Mõõtepiirkonna suurendamiseks kasutati kokku kolme INA219 voolusensorit mis tulenevalt Oomi seadusest võimaldavad 24 V pinge juures kasutada maksimaalse võimsusena 230 W.

Testide käigus leiti, et 3,2 A voolu kasutamisel kuumenevad voolusensorid üle ning seejärel deformeeruvad. Maksimaalselt 2 A voolu ja 144 W võimsuse kasutamisel jäävad sensorid stabiilsesse olekusse.

Jooniselt 4.2 on näha üheksat horisontaalselt paigaldatud ja polüamiidteibiga isoleeritud takistustraati. Takistustraadi read jagunevad kokku kolmeks küttekehaks. Ühe rea takistuseks on 14,4 Ω .

Kolme rööbiti ühendatud takistustraadi rea takistus leiti valemiga

$$R = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}} = \frac{1}{\frac{1}{14,4} + \frac{1}{14,4} + \frac{1}{14,4}} = 4,8 \, \Omega , \quad (4.1.)$$

kus R on paralleelselt ühendatud takistustraadide summaarne takistus, Ω ;

R_n - ühe takistustraadi rea takistus.

Ühe küttekeha kogutakistuseks saadi 4,8 Ω .

Ühe küttekeha võimsuse leiti vastavalt Oomi seadusele valemiga

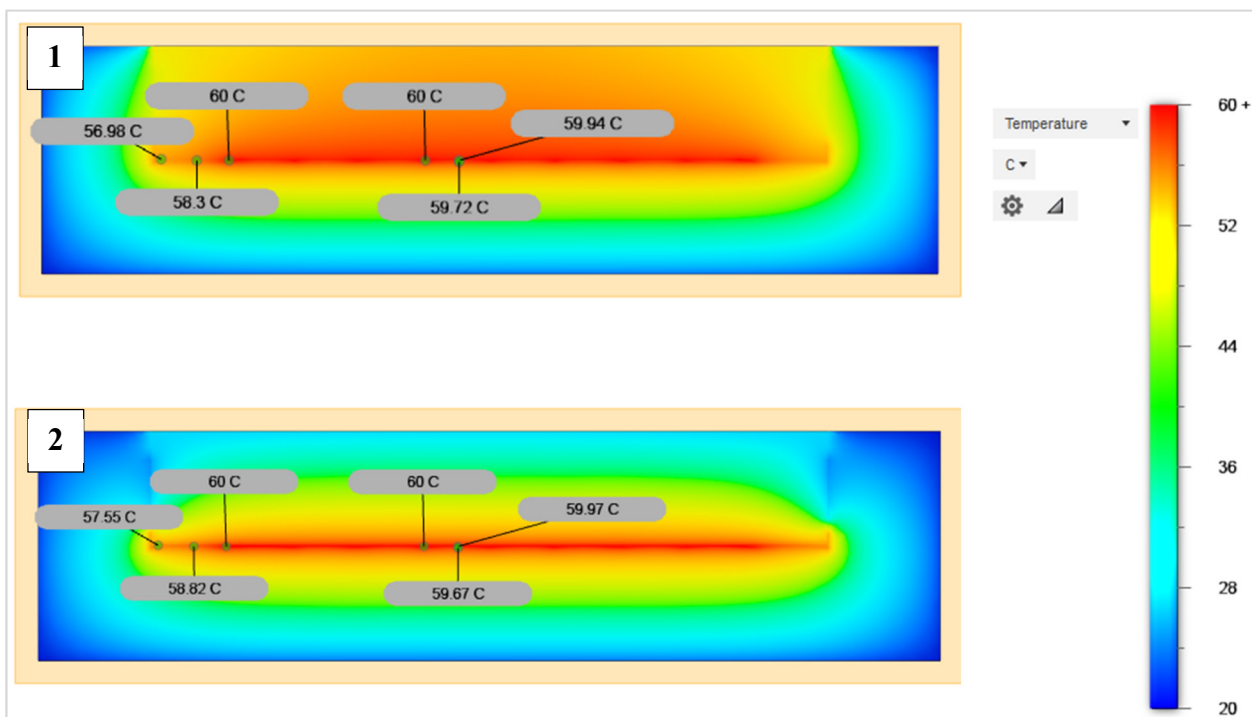
$$P = \frac{U^2}{R} = \frac{24^2}{4,8} = 120 \, \text{W} , \quad (4.2.)$$

kus P on võimsus, W ;

U - pinge, V.

Ühe küttekeha võimsuseks saadi 120 W. Kolme küttekehavõimsuseks on seega kokku 360 W.

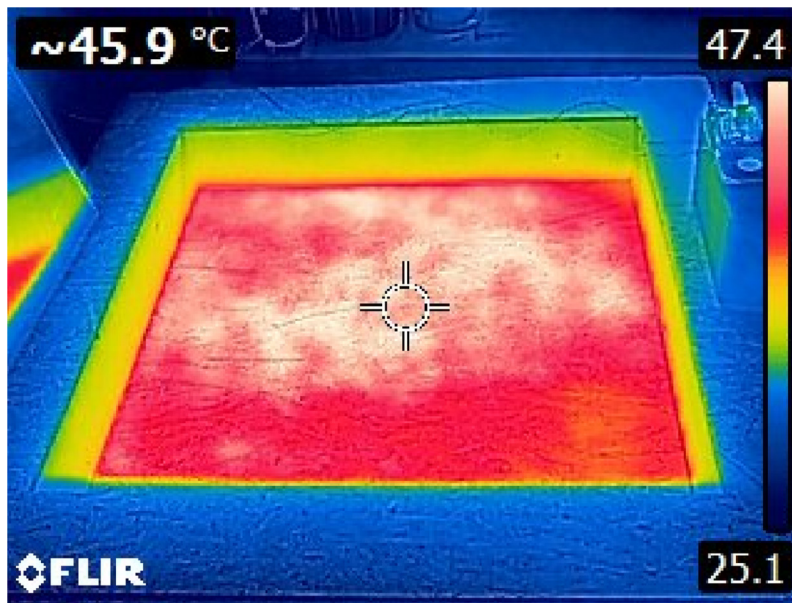
Temperatuuri ühtlaselt jaotuvuse kontrollimiseks terve kuumutusplaadi ulatuses kasutati programmi Fusion 360 simulatsiooni (joonis 4.3).



Joonis 4.3. Kuumutusplaadil temperatuuri jagunemise kontrollimine keskkonnas Fusion 360 abil. 1 - uuritav materjal soojusjuhtivusega 1,38 W/(m·K); 2 - uuritav materjal soojusjuhtivusega 0.05 W/(m·K)

Jooniselt 4.3 simulatsiooni tulemustest on näha, et suurim temperatuuri erinevus on kuumutusplaadi ääres. Temperatuuri erinevuseks ülejäänud kuumutusplaadi pinnaga on esimese materjali mõõtmisel ümardatult 3 K ja teise materjali mõõtmisel ligikaudu 2,5 K. Mõõdetava materjali soojusjuhtivusest kuumutusplaadi temperatuuri ühtlus olulisel määral ei erine. Temperatuur erineb takistustraaside vahelisel alal ümardatult 0,3 K. Simulatsiooni tulemustest võib järeldada, et keskmiselt on kuumutusplaadi temperatuurierinevus seadeväärtusest väiksem kui 1 K.

Lisaks Fusion 360 simulatsioonile mõõdeti termokaameraga konstrueeritud mõõture temperatuure. Termokaamerana kasutati mõõteseadet Flir E5. Mõõtetulemused on esitatud joonisel 4.4.



Joonis 4.4. Termokaamera Flir E5 jäädvustatud termopilt

Joonis 4.4 on näha, et kuumutusplaadi pinna temperatuur keskel on 45,9 °C ja maksimaalseks temperatuuriks on 47,4 °C, seega on maksimaalseks temperatuuride erinevuseks 1,3 K.

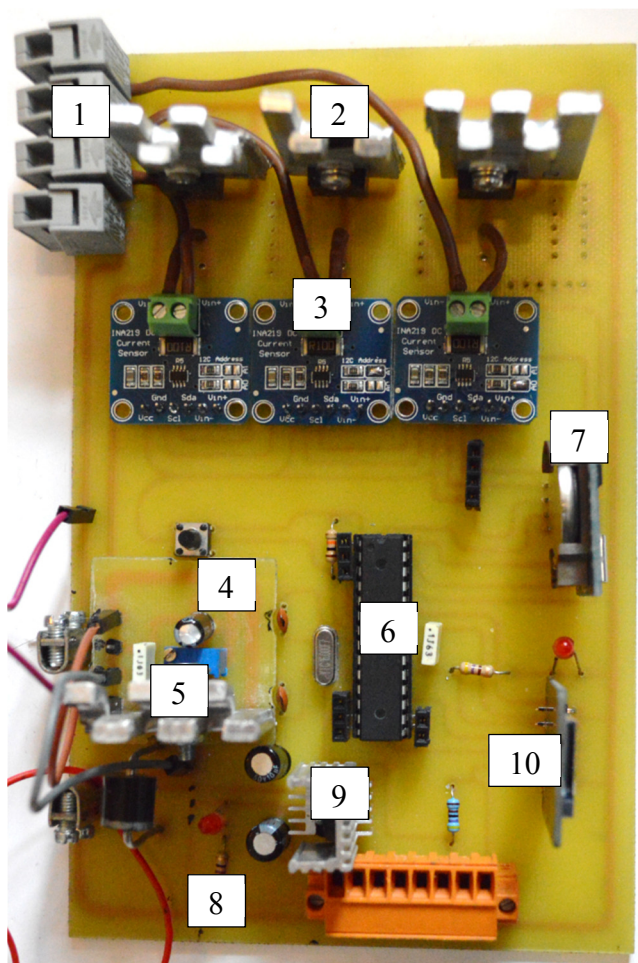
4.3 Kontroller

Soojusjuhtivuse mõõturi juhtkontroller põhineb Atmega328P mikrokontrolleri kiibil. Kontrolleri põhifunktsiooniks on kuumutusplaadi temperatuuri automaatreguleerimine. Temperatuuri reguleerimiseks on programmeeritud kontrollerisse Arduino IDE keskkonnas PI-regulaatori algoritm.

Reguleerimine toimub pulsilaiusmodulatsiooni meetodil läbi kolme jõuvälja-transistori IRFZ44N.

Lisaks temperatuuri reguleerimisele täidab kontroller ka logeri funktsiooni, kus SD kaardile salvestatakse voolusensorite INA219 poolt mõõdetav voolutugevus ja DS18B20 temperatuurisensorite temperatuur. Kõik andmed salvestatakse koos kellaaajaga reaalaaja kellamooduli RTC DS1307 abil.

Joonisel 4.5 on esitatud konstrueeritud soojusjuhtivuse mõõturi kontrolleri foto. Keskkonnas Eagle loodud kontrolleri trükkplaadi elektriskeem on esitatud lisades H ja I.



Joonis 4.5. Soojusjuhtivuse mõõtori kontrolleri. 1 - kuumutusplaadi elektrilise toite ühenduspistikud; 2 - IRFZ44N jõuvälja transistorid 3 tk ; 3 - *INA219* voolusensorid 3 tk; 4 - kontrolleri taaskäivituse lüliti; 5 - LM317 pingeregulaator; 6 - Atmega328P mikrokontroller; 7 - RTC DS1307 realaja kellamoodul; 8 - toite sisselülitamise indikaator *LED*; 9 - 7085T pingeregulaator; 10 – Micro-SD mälukaardi lugeja

5. KONTROLLERI PROGRAMMEERIMINE

5.1 PI-temperatuuri regulaator

Kontrolleri lähtekood koos koodisistest kommentaaridega on esitatud lisa E. [20-29]

PI-regulaatori tööpõhimõte ja kontrollerisse programmeeritav algoritm on järgmine:

- 1) Kuumutusplaadi temperatuuri sätestamine;
- 2) Kuumutusplaadi temperatuuri mõõtmine sensoritega DS18B20;
- 3) Mõõdetud temperatuuri lahutamine seadeväärtusest; [11, 20]
- 4) Saadud temperatuuri vahe korrutatakse võimendusteguri P-komponendi konstandiga k_p ; [10, 19]
- 5) Temperatuuride mõõdetakse iga 750 ms tagant tulenevalt sensori tehnilistest parameetritest; [19]
- 6) Iga mõõtmistsükli jooksul koos seadeväärtuse ja reaalse temperatuuri vahe vähenemisega vähendatakse ka võimendustegurit; [10, 20]
- 7) Temperatuuri täpsemaks reguleerimiseks kasutatakse ka I-komponendi võimendustegurit k_i -d; [10, 20]
- 8) I-komponent saadakse liites omavahel eelmise mõõtmiskorra I väärtus ning k_i väärtuse ja temperatuuri vahe korrutis; [20]
- 9) Lõpuks liidetakse P- ja I-komponendi väärtused; [20]
- 10) Vastavalt P- ja I-komponendi summale toimub pulsilaiusmodulatsioon (*PWM*) sagedusel 3921.16 Hz. Tegu on konstantse amplituudiga impulsside jadaga kus periood on konstantne kuid impulsside kestus muutub. Pulsilaiusmodulatsiooniga muudetakse jõu-väljatransistorist väljuvat keskmist võimsust vaadeldava ajaühiku jooksul. Atmega328P PWM3 väljundist väljastatava signaali impulsilaius on määratud 8 bitise väärtusega vahemikus 0-255. Näiteks kui tahetakse, et küttekeha töötaks 50 % võimsusega siis väljastatakse väärtus 128. [21]

Käesolevas projektis on kasutada 360 W võimsusega toiteplokk ning väljundvõimsuse reguleerime toimub PI- regulaatoriga sagedusel 3921,16 Hz. Näiteks kui soovime, et ühe minuti jooksul töötaks kuumutusplaat keskmise võimsusega 50 W, siis esmalt leiame perioodi kahe impulsi vahel valemiga [21]

$$f = \frac{1}{T} \Rightarrow t = \frac{1}{f} = \frac{1}{3921,16} = 0,000255 \text{ s}, \quad (5.1.)$$

kus T on periood kahe impulsi vahel, s,
 f - sagedus, 3921 Hz,

Periood kahe impulsi vahel on 0,000255 sekundit.

Järgmisena leiame impulsi kestuse valemiga [21]

$$P \cdot T_{impulss} = P_{kesk} \cdot T_{impulss} \Rightarrow T_{impulss} = \frac{P_{kesk} \cdot T_{impulss}}{P} \quad (5.2.)$$

$$T_{impulss} = \frac{50 \cdot 0,00025}{360} = 0,000035 \text{ s},$$

kus $T_{impulss}$ on impulsi kestus, s;
 P_{kesk} - küttekeha soovitud keskmine võimsus, W;
 P - toiteploki võimsus, W.

Impulsi kestuseks saime 0,000035 sekundit.

Järgmisena leiame töötsükli valemiga [21]

$$DC = \frac{T_{impulss}}{T} \cdot 100 = \frac{0,000035}{0,00025} \cdot 100 = 14 \%, \quad (5.3)$$

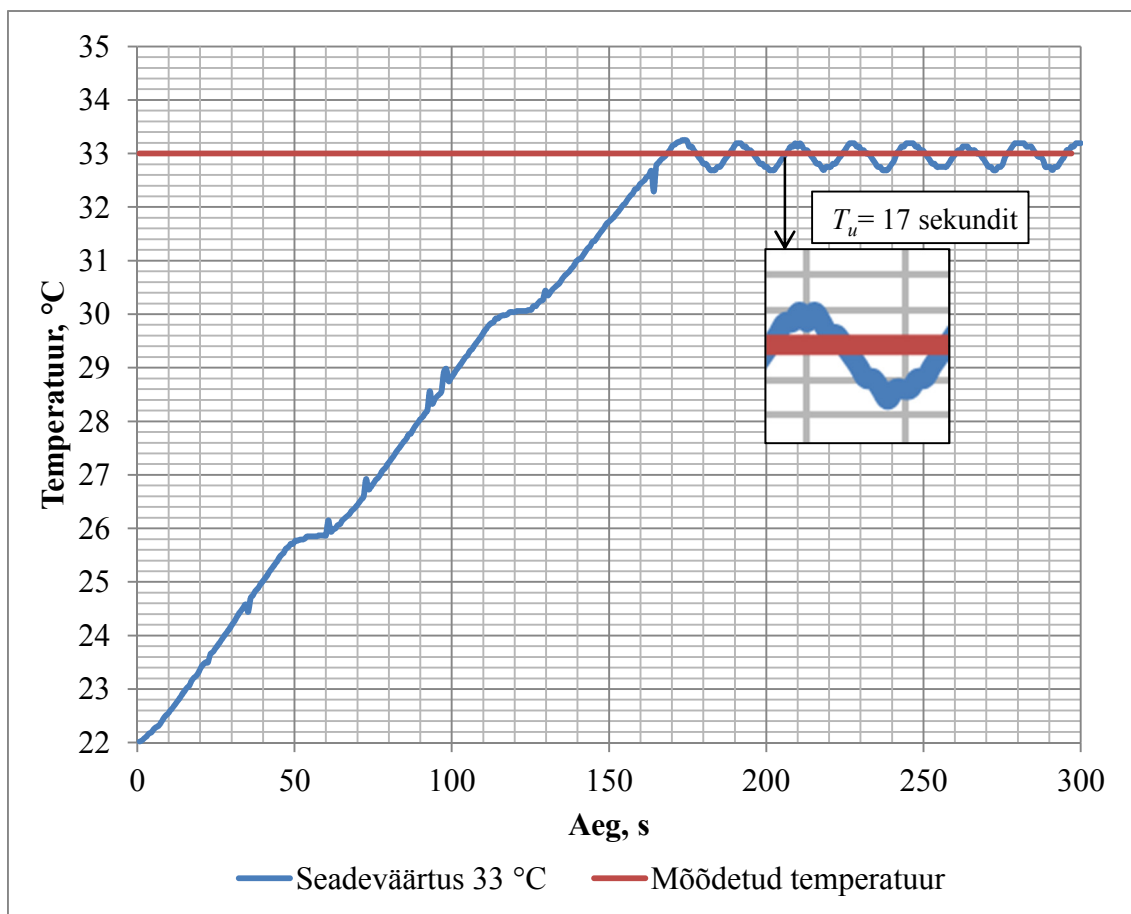
kus DC on töötsükkel, %;

Töötsüklikuks saime 14 % mis tähendab, et sama töötsükliga minuti jooksul antakse küttekehale keskmise võimsusena 14 % toiteploki maksimaalsest võimsusest.

5.1.1 PI-regulaatori võimendustegurite leidmine

Esmalt tehakse katsed PI-regulaatori P -komponendi võimendusteguri k_p leidmiseks. Temperatuuri seadeväärtuseks võeti 33 °C. I-komponent k_i seadistati mõõtmise ajaks võrdseks nulliga. Seejärel leiti katseliselt stabiilne olukord kus temperatuur jäi seadeväärtuse ümber (siinuseliselt) kõikumama. [11, 20]

Katsetulemus on esitatud joonisel 5.1



Joonis 5.1. Reguleeritud P-kontrolleri testitulemus, $k_p=400$ ja $k_i=0$

Õige võimendusteguri k_p leidmisel jõuab temperatuur kiiremini soovitud väärtuseni ning jääb stabiilselt seadeväärtuse ümber kõikumata tekitades ühtlase siinuse, nagu on näha joonisel 5.1. Antud juhul on tegemist P-kontrolleriga ning stabiilse võimendustegurina kasutame väärtust $k_p = 400$. [20]

I-komponendi ajakonstant leitakse arvutamise teel kasutades Ziegler-Nicholsi valemeid kus stabiilne võimendustegur k_p tähistatakse edaspidi K_{pu} . P-kontrolleri graafikult mõõdetakse ära tekkinud siinuse periood T_u (joonis 5.1). Siinuse perioodiks saadi 17 sekundit. [20]

Kasutades PI-regulaatori seadistamiseks Ziegler-Nicholsi meetodid leitakse võimendusteguri konstant vastavalt $k_p = 0,45 \cdot K_{pu}$, ja integrali ajakonstant $T_i = 1,2 \cdot k_p / T_u$. [20].

P võimendustegur on leiti valemiga [20]

$$k_p = 0,45 \cdot K_{pu} = 0,45 \cdot 400 = 180 \quad (5.4.)$$

kus K_{pu} on katseliselt leitud P võimendustegur.

Võimendusteguriks saadi 180.

I-komponendi ajakonstant leiti valemiga [20]

$$T_i = \frac{1,2 \cdot k_p}{T_u} = \frac{1,2 \cdot 180}{17} = 12,7 \text{ s}, \quad (5.5.)$$

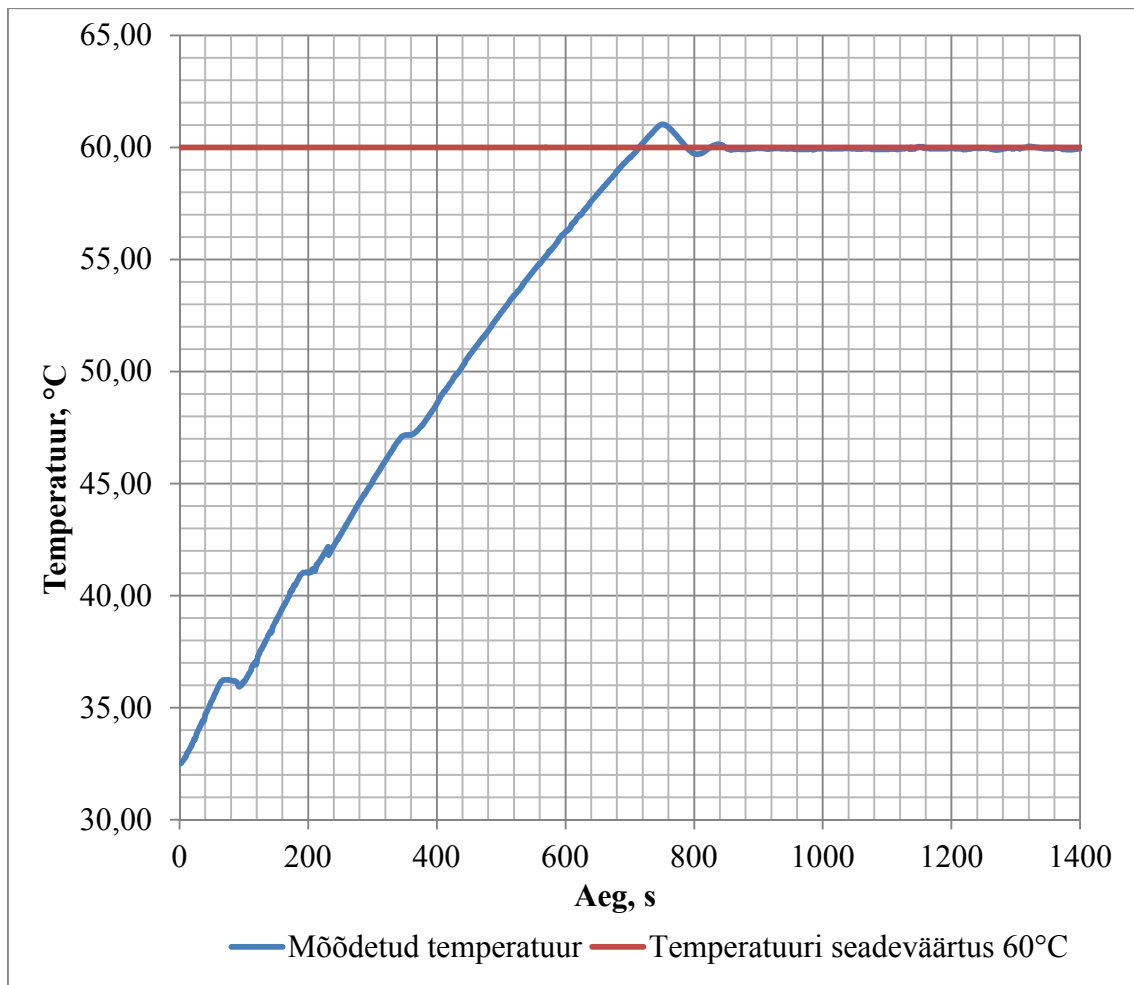
kus T_i on I-komponendi ajakonstant, s;

k_p - arvutatud P võimendustegur;

T_u - graafikult mõõdetud siinuse periood, s.

I-komponendi ajakonstandiks saadi 12,7 sekundit.

Joonisel 5.2 on esitatud katsetulemused stabiilse temperatuuri saavutamisest. Antud katse ajal mõõdeti Skano puitkiudplaadi soojusjuhtivust.



Joonis 5.2. Reguleeritud PI kontrolleri testitulemus, $k_p=180$ ja $k_i=7.25$

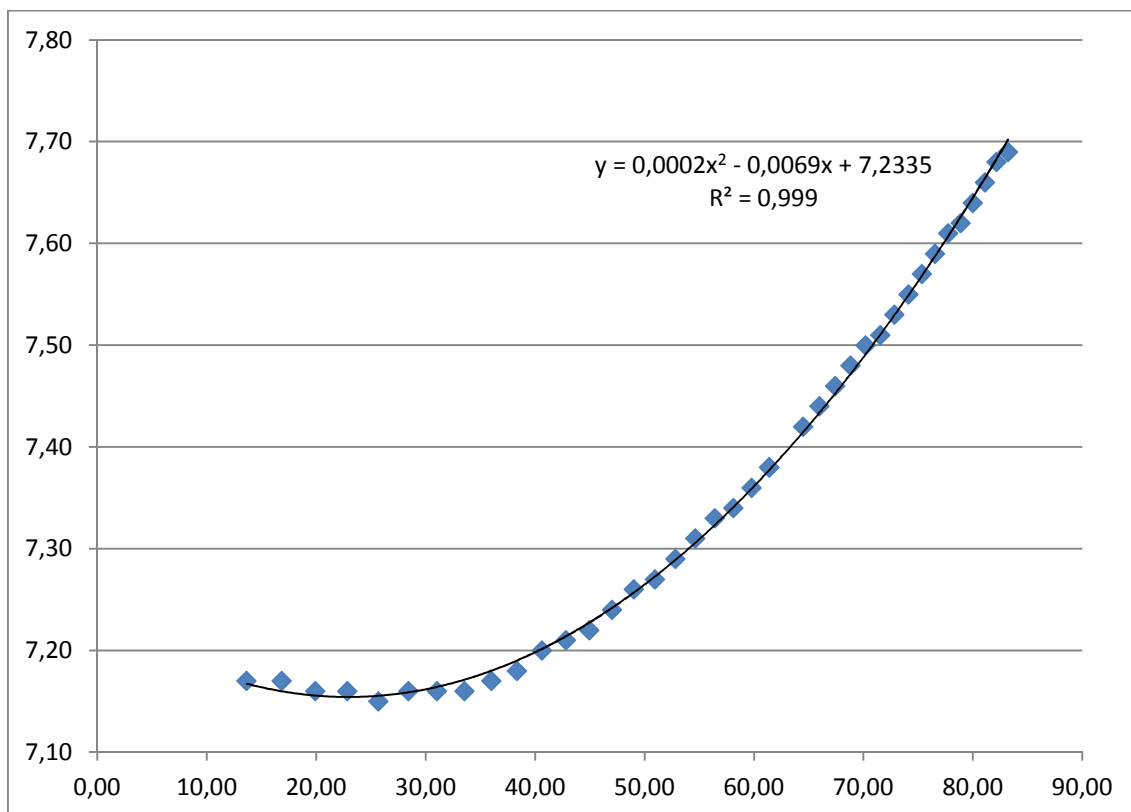
Jooniselt 5.2 on näha, et ligikaudu 14 minutiga saavutatakse stabiilne temperatuur. Reguleerimisest sõltumata jääb temperatuur $\pm 0,06$ °C seadeväärtuse juures kõikumama.

6. MATERJALI SOOJUSJUHTIVUSE EKSPRESSMÕÕTURI TESTMÕÕTMISED

6.1 Soojusvoo leidmise võimalusi ekspressmõõduri testimisel

Uuritava materjali soojusjuhtivuse leidmiseks on vaja leida mõõduri piiretest väljuv soojusvoo võim.

Arvutusliku soojusvoo leidmiseks läbi konstrueeritava mõõduri piirete viidi läbi Scilabis simulatsioon kus mõõdeti materjalide soojusjuhtivust vahemikus 0,05-1 W/(m·K) sammuga 0,025 W/(m·K). Kuumutusplaadi seadeväärtuseks määrati 60 °C ja välistemperatuuriks 20 °C. Ülesse märgiti kuumutusplaadi võimsus ja soojusvoog läbi piirete. Vastavalt graafikule leiti trendijoone funktsioon. Graafik on esitatud joonisel 6.1.



Joonis 6.1. Soojusvoog läbi piirete sõltuvalt kuumutusplaadi võimsusest.

Joonisel 6.1 esitatud trendijoone ruutfunktsiooni kirjeldab determinatsiooni kordaja järgi 99,9 % täpsusega soojusvoo väljumist piiretest sõltuvalt kuumutusplaadi võimsusest. Funktsiooni $y = 0,0002x^2 - 0,0069x + 7,2335$ kasutamine parandustegurina piiretest väljuva soojusvoo leidmiseks eeldab, et väliskeskkonna ja kuumutusplaadi temperatuuride

vahe on alati 40 °C. Scilabis modelleeritud mudeli abil on võimalik antud meetodil katseliselt leida ka teisi parandusettevõtteid.

Teise meetoodina on võimalus piiretest väljuv soojusvoog leida mõõtes ekspresmõõduri pindade temperatuuri. Antud meetodiga täpsuse saavutamine eeldab võimalikult paljude punktide mõõtmist mõõduri pindadel. Käesolevas töös asetati tulemuste saamiseks igale pinnale va. jahutusplaadile üks temperatuurisensor. Hilisemate mõõtmiste korral on rohkemate temperatuuri sensorite süsteemi lisamine lihtsasti sooritatav.

Väljuv soojusvoog leiti valemiga [1: 33]

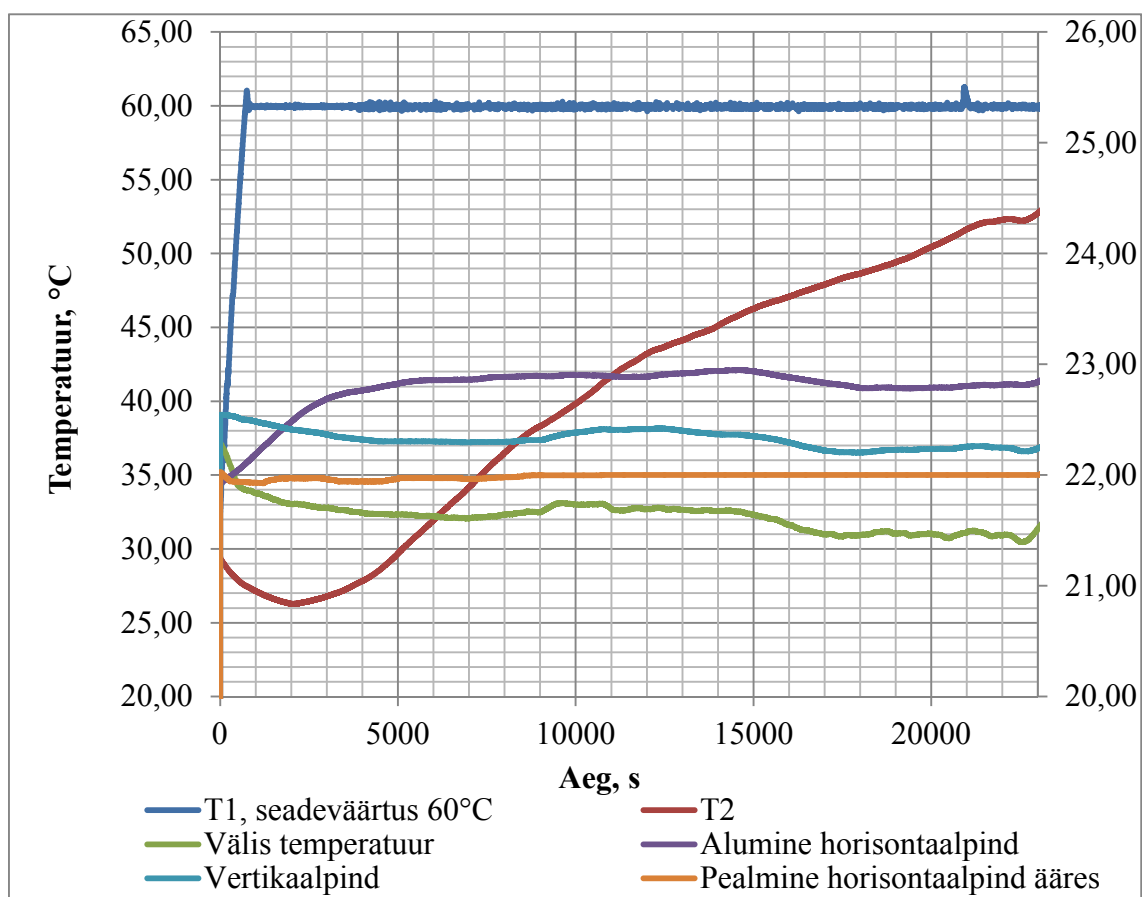
$$q = \alpha \cdot \Delta T \cdot S, \quad (6.1.)$$

Arvutuste tegemisel kasutati simulatsioonis leitud soojusülekannekoefitsiente lähtuvalt pinna asendist ja välistemperatuurist, kuna selgus, et mõõdetavate materjalide soojuslikest omadustest soojusülekannekoefitsient sõltuvus on tühine.

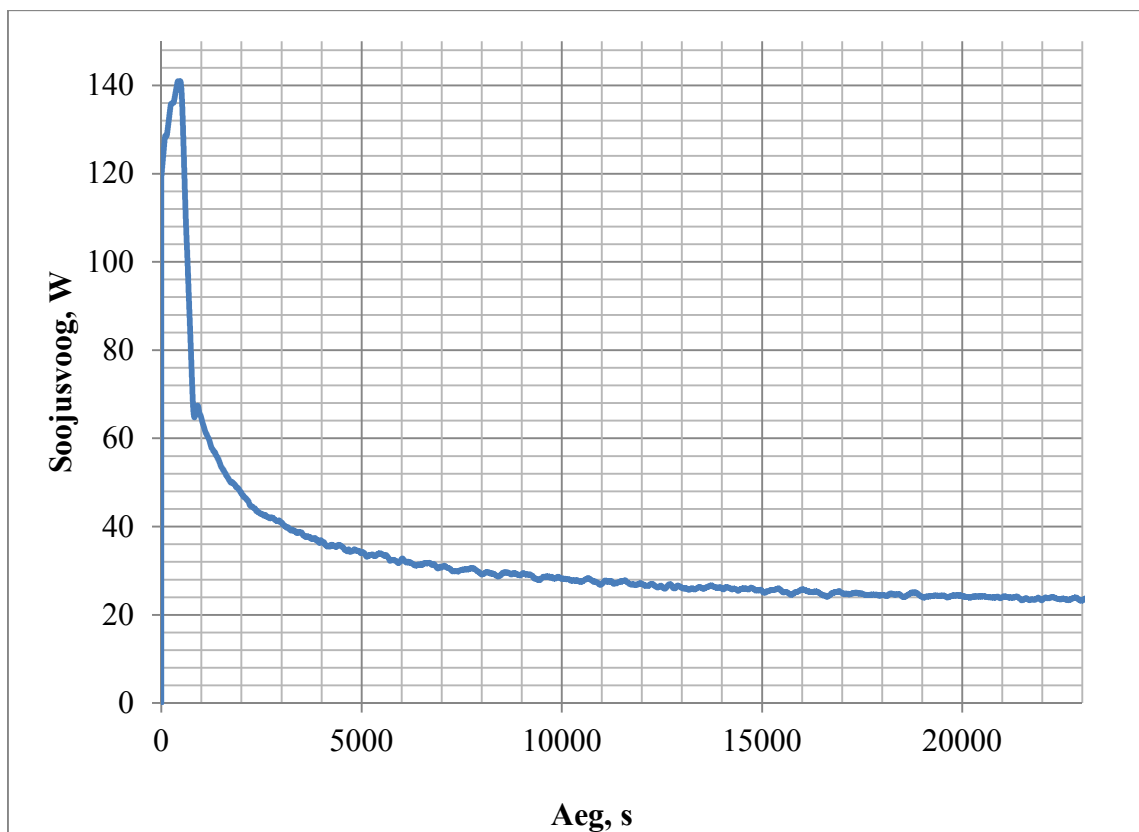
6.2 Materjalide soojusvoo mõõtetulemused

Kokku mõõdeti kolme eelpool töös kirjeldatud materjali soojusjuhtivust: *Skano* puitkiud põrandaalusplaat, Bauroc Element boorbetooni plokk ja tundmatu soojusjuhtivusega saepuru-lubi puistesoojusisolatsiooni segu.

Skano puitkiudplaadi mõõtetulemused on esitatud joonistel 6.2 ja 6.3. ning koondatult koos arvutustulemustega tabelis 6.1.



Joonis 6.2. *Skano* puitkiudplaadi soojusjuhtivuse mõõtetulemused, temperatuur



Joonis 6.3. Skano puitkiudplaadi soojusjuhtivuse mõõtetulemused, mõõteseadmest väljuv soojusvoog

Tabel 6.1. Skano puitkiudplaadi soojusjuhtivuse mõõtetulemused

Uuritava materjali pealmise pinna T_2 temperatuur, °C	24,33
Pealmise horisontaalpinna äärmise ala temperatuur, °C	22
Vertikaalpinna temperatuur, °C	22,24
Alumise horisontaalpinna temperatuur, °C	22,8
Välistemperatuur, °C	21,58
Mõõteseadmest väljuv soojusvoog, W	23,25
Piiretest väljuv soojusvoog, W	8,687
Kiirguslik soojuslevi, W	7,381

Skano puitkiudplaadi soojusjuhtivus leitakse vastavalt valemile (1.1.) arvestades konvektiivset ja kiirgusliku soojuslevi mõõduri piiretest

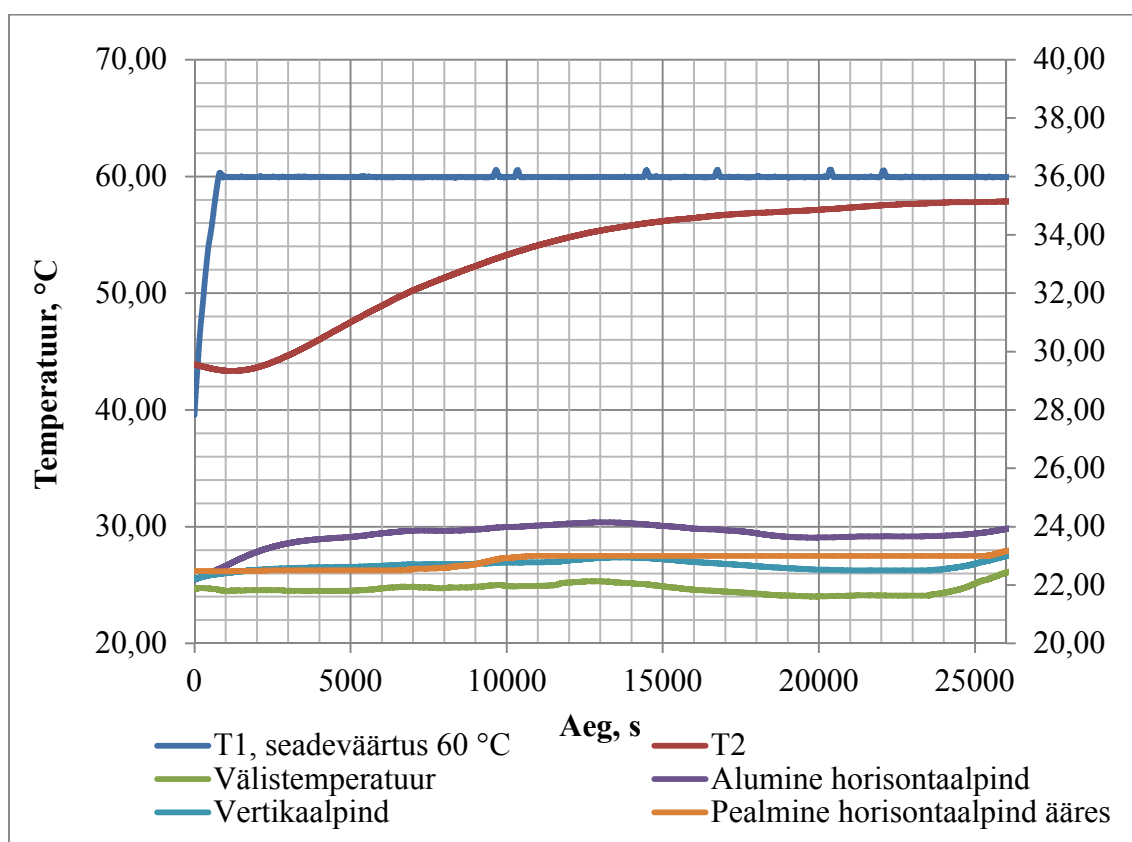
$$\lambda = \frac{\delta \cdot (q_{\text{valjuv}} - (q_{\text{kiirguslik}} + q_{\text{konvektiivne}}))}{S \cdot \Delta T} = \quad (6.2.)$$

$$= \frac{0,098 \cdot (23,3 - (8,687 + 7,381))}{0,36 \cdot (24,33 - 21,58)} = 0,055 \text{ W/(m}\cdot\text{K)},$$

kus q_{valjuv} on mõõdurist väljuva soojusvoog, W;
 $q_{\text{kiirguslik}}$ - piirete kiirguslik soojuslevi võimsus, W;
 $q_{\text{konvektiivne}}$ - piirete konvektiivne soojuslevi võimsus, W.

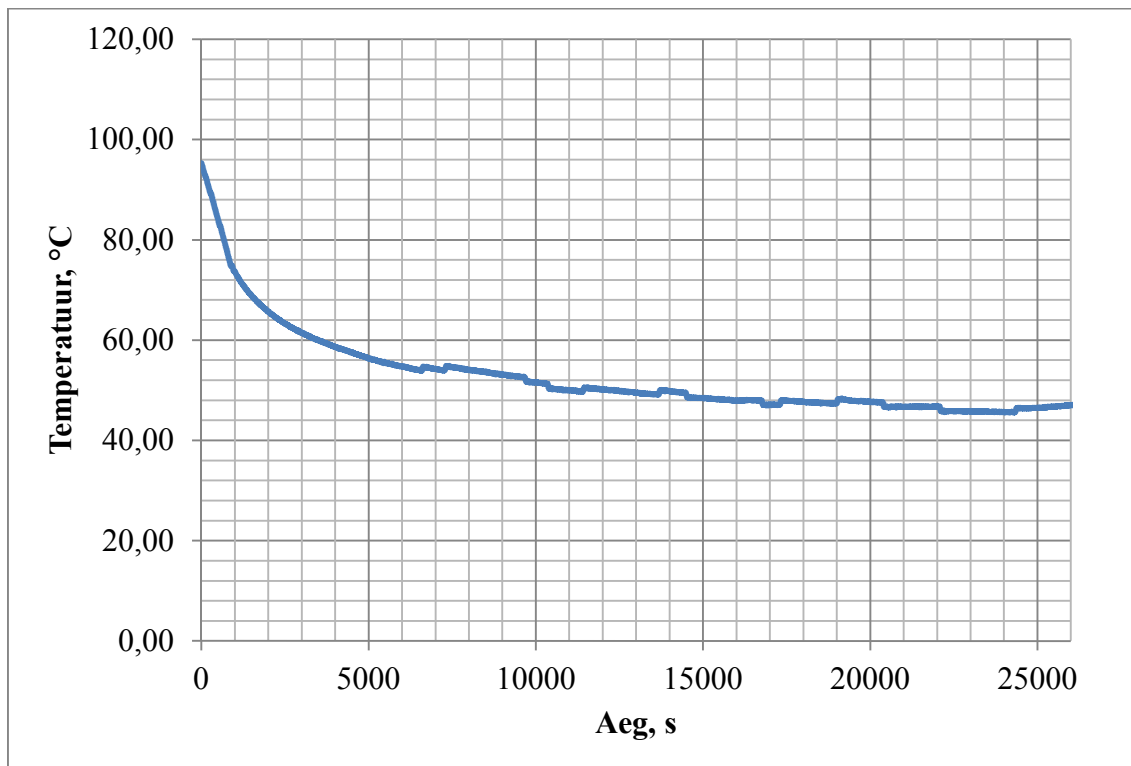
Skano puitkiudplaadi soojusjuhtivuseks saadi 0,055 W/(m·K). Saadud tulemus on ligilähedane tootja poolsetele andmetele 0,05 W/(m·K).

Bauroc Element boorbetonploki mõõtetulemused on esitatud joonistel 6.4 ja 6.5. ning koondatult koos arvutustulemustega tabelis 6.2.



Joonis 6.4. Bauroc Element boorbetonploki soojusjuhtivuse mõõtetulemused, temperatuur

Joonis 6.5. Bauroc Element boorbetoonploki soojusjuhtivuse mõõtetulemused, mõõteseadmest väljuv soojusvoog



Tabel 6.2. Bauroc Element boorbetoonploki soojusjuhtivuse mõõtetulemused

Uuritava materjali pealmise pinna T_2 temperatuur, °C	35,12
Pealmise horisontaalpinna äärmise ala temperatuur, °C	23
Vertikaalpinna temperatuur, °C	22,5
Alumise horisontaalpinna temperatuur, °C	23,69
Välistemperatuur, °C	21,64
Mõõteseadmest väljuv soojusvoog, W	45,60
Piiretest väljuv soojusvoog, W	15,20
Kiirguslik soojuslevi, W	12,57

Bauroc Element boorbetoonploki soojusjuhtivus leitakse vastavalt valemile 1.1 arvestades konvektiivset ja kiirgusliku soojuslevi mõõturi piiretest

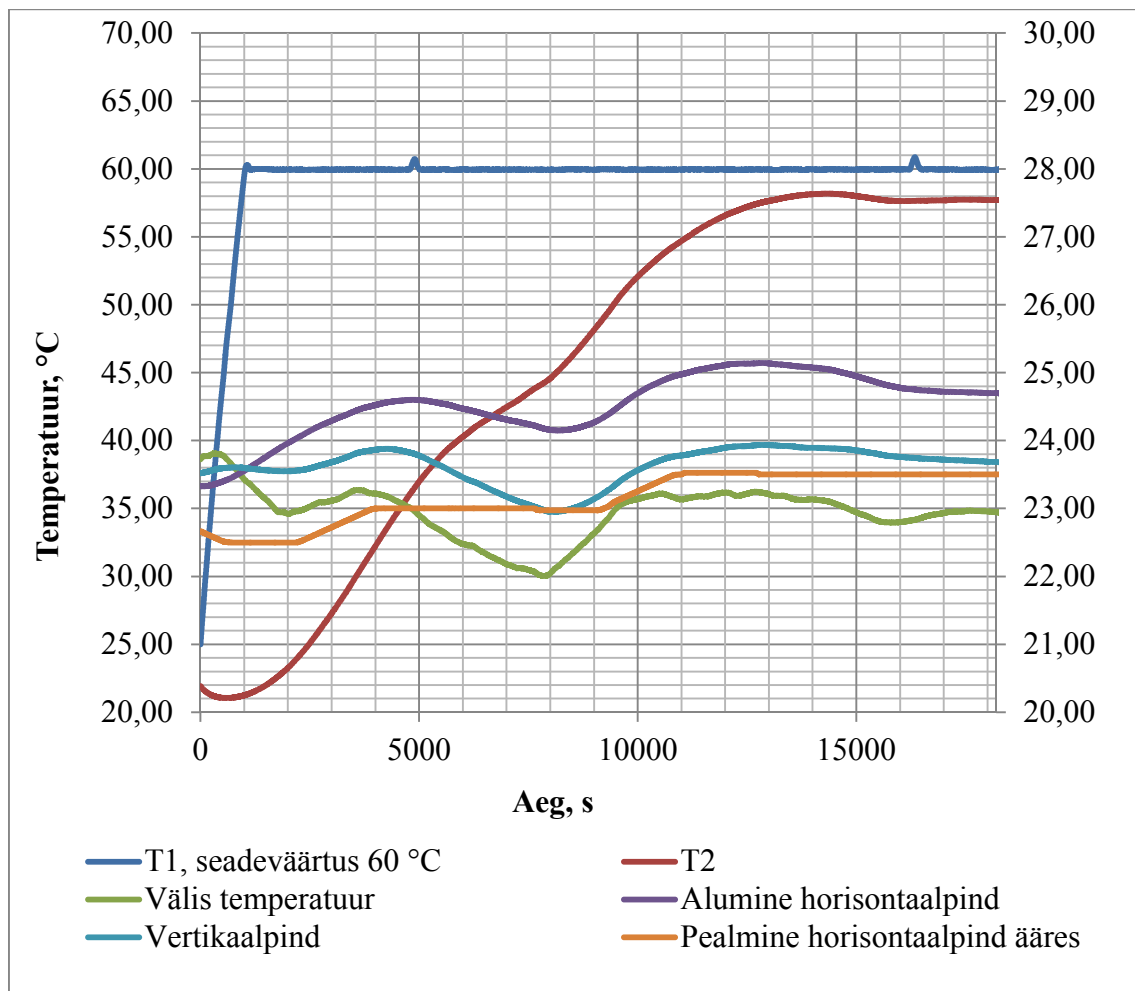
$$\lambda = \frac{\delta \cdot (q_{\text{väljuv}} - (q_{\text{kiirguslik}} + q_{\text{konvektiivne}}))}{S \cdot \Delta T} = \quad (6.3.)$$

$$= \frac{0,1 \cdot (45,6 - (12,57 + 15,2))}{0,36 \cdot (60 - 35,12)} = 0,199 \text{ W/(m}\cdot\text{K)},$$

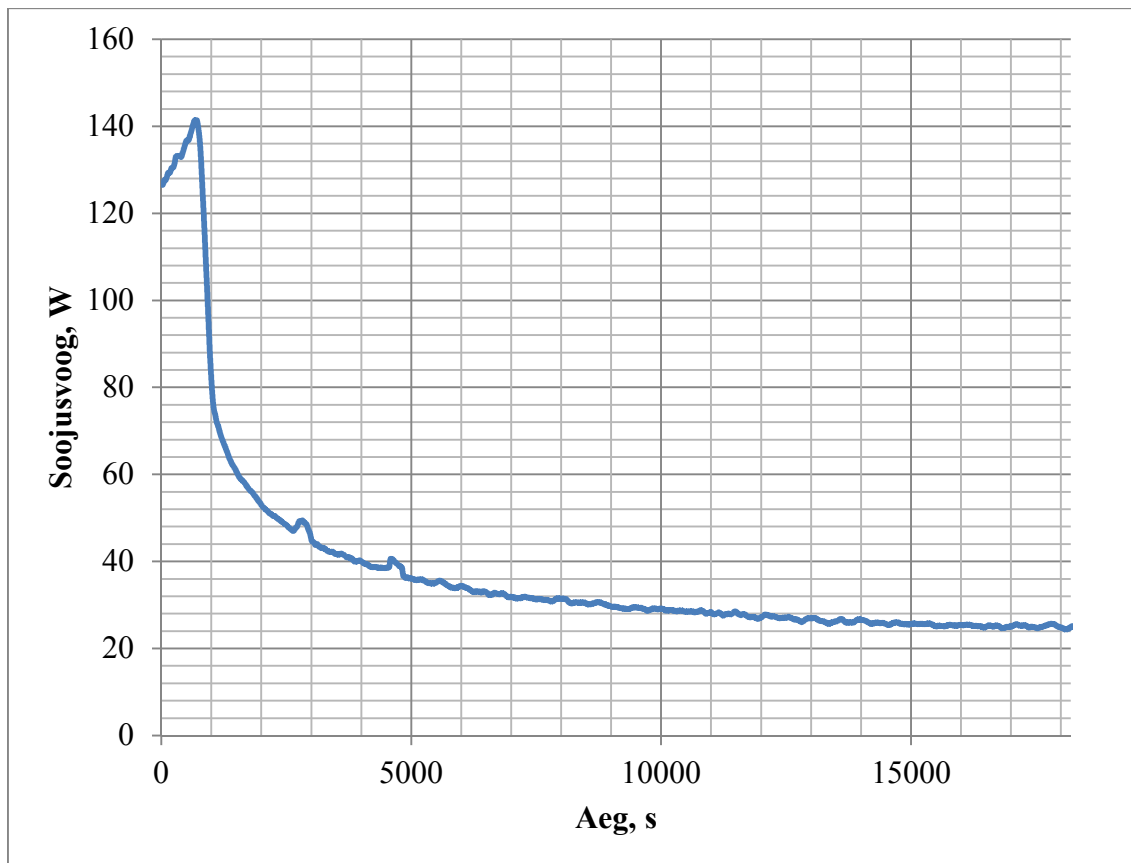
kus $q_{\text{väljuv}}$ on mõõturist väljuva soojusvoog, W;
 $q_{\text{kiirguslik}}$ - piirete kiirguslik soojuslevi võimsus, W;
 $q_{\text{konvektiivne}}$ - piirete konvektiivne soojuslevi võimsus, W.

Bauroc Element boorbetonploki soojusjuhtivuseks saadi 0,199 W/(m·K).

Saepuru-lubja puistesoojusisolatsiooni mõõtetulemused on esitatud joonistel 6.6 ja 6.7 ning koondatult koos arvutustulemustega tabelis 7.3.



Joonis 6.6. Saepuru-lubja soojusjuhtivuse mõõtetulemused, temperatuur



Joonis 6.7. Saepuru-lubja soojusjuhtivuse mõõtetulemused, mõõteseadmest väljuv soojusvoog

Tabel 6.3. Saepuru-lubja soojusjuhtivuse mõõtetulemused

Uuritava materjali pealmise pinna T_2 temperatuur, °C	27,62
Pealmise horisontaalpinna äärmise ala temperatuur, °C	23,5
Vertikaalpinna temperatuur, °C	23,9
Alumise horisontaalpinna temperatuur, °C	25.14
Välistemperatuur, °C	23,23
Mõõteseadmest väljuv soojusvoog, W	25,6
Piiretest väljuv soojusvoog, W	9,9
Kiirguslik soojuslevi, W	9,75

Saepuru-lubja soojusjuhtivus leitakse vastavalt valemile (1.1.) arvestades konvektiivset ja kiirgusliku soojuslevi mõõture piiretest

$$\lambda = \frac{\delta \cdot (q_{\text{valjuv}} - (q_{\text{kiirguslik}} + q_{\text{konvektiivne}}))}{S \cdot \Delta T} = \quad (6.4.)$$

$$= \frac{0.1 \cdot (25,6 - (9,75 + 9,94))}{0,36 \cdot (60 - 27,62)} = 0.052 \text{ W/(m}\cdot\text{K)},$$

kus q_{valjuv} on mõõturest väljuva soojusvoog, W;
 $q_{\text{kiirguslik}}$ - piirete kiirguslik soojuslevi võimsus, W;
 $q_{\text{konvektiivne}}$ - piirete konvektiivne soojuslevi võimsus, W.

Saepuru-lubja soojusjuhtivuseks saadi 0.052 W/(m·K).

Konstrueeritud ekspressmõõturiga mõõdetud tulemused erinesid tehnilises dokumentatsioonis esitatud soojusjuhtivusest. Kõige ligilähedasem tulemus oli Skano puitkiudplaadil kus mõõdetud soojusjuhtivuse tulemus erines ligikaudu 9 % dokumentatsioonis esitatust. Bauroc Element boorbetonploki soojusjuhtivus erines ligikaudu 45 % dokumentatsioonis esitatust. Bauroc Element boorbetooni soojusjuhtivuse erinevus oli tingitud materjali salvestunud niiskusest. Niiskuse olemasolu indikatsiooniks oli alumiiniumist katteplaadi alla tekkinud kondensaad pärast mõõtmist.

Kõige väiksema soojusjuhtivusega materjaliks oli mõõtetulemuste põhjal Saepuru-lubja segu.

Testmõõtmistest võib järeldada, et konstrueeritud ekspressmõõture näol on tegu töötava süsteemiga ning on võimalik erinevate materjalide soojusjuhtivust oma vahel võrrelda. Süsteemi täpsust pole saadud tulemuste põhjal võimalik hinnata. Täpsuses hindamiseks ja mõõteseadme kalibreerimiseks tuleb läbi viia rohkem katseid rohkemate materjalidega. Lisaks tuleks kasutada mõõture pinnatemperatuuride mõõtmiseks rohkem temperatuuri sensoreid.

KOKKUVÕTE

Töö eesmärgiks oli konstrueerida ekspressmõõtur millega on võimalik mõõta tundmatu materjali soojusjuhtivust. Mõõteseade konstrueeriti võimalikult lihtsalt kasutatavaks.

Kuumutusplaadi stabiilse temperatuuri saavutamiseks programmeeriti Atmega328P baseeruva kontrolleri mikrokontrollerisse PI-regulaatori algoritm. PI-regulaator seadistamiseks teostati testmõõtmised. Ekspressmõõturist lahkuv soojuvoog leiti lähtuvalt kuumutusplaadi hetkvõimsusest mõõtmise kestel. Võimsus avaldati mõõtes *INA219* mikrokiibil baseeruvate voolusensoritega voolutugevust ja lähtuvalt pingest avaldati Oomi seaduse kaudu kuumutusplaadi võimuse. Mõõtuuri pindade temperatuure mõõdeti temperatuurisensoritega DS18B20. Tegu on digitaalsete sensoritega ning iga sensor omab teistest erinevat tehase poolt programmeeritud aadressi, antud asjaolu võimaldas sensorite ühendamiseks kasutada ainult ühte signaalkaablit ja kahte toitekaablit.

Nõueteks seati veel mõõtmistulemuste salvestamine kontrolleri poolt reaajas välisele andmekandjale ja mõõtmise monitoorimise võimalus jadasiin ühenduse kaudu. Nii on andmete salvestamise tõttu võimalik materjali soojusjuhtivust määrata hilisema andmetöötluse abil.

Töö esimeses pooles modelleeriti keskkonnas Scilab Xcos konstrueeritava ekspressmõõtuuri soojuslevi elektrilise aseskeemi mudel mis võimaldas simulatsioonis analüüsida mõõteseadmes toimuvaid soojuslike protsesse, analüüsida ja kontrollida mõõtetulemusi ja konstruktsioonis kasutatud materjalide soojuslike omaduste piisavust. Lisaks võimaldas modelleeritud mudel jälgida soojusvahetuse protsessi kulgu ajas ning prognoosida mõõtmiste ajalist kestust.

Töö lõpus teostati konstrueeritud soojusjuhtivuse ekspressmõõturiga testmõõtmised kahe materjaliga, mille soojusjuhtivus oli tootja poolt tehnilises dokumentatsioonis esitatud. Mõõdetud materjalideks olid Skano puitkiud põrandalusplaat ja Bauroc Element boorbeton plokk. Lisaks mõõdeti ka tundmatu soojusjuhtivusega saepuru-lubi isolatsiooni soojusjuhtivust. Mõõdetud tulemused erinesid tootja poolsetest andmetest vastavalt Bauroc Element plokil 45 % ja Skano puitkiudplaadil 9 %. Testi tulemuste põhjal võib väita, et eelpool püstitatud nõuete maht on täidetud ning tegu on funktsioneeriva

süsteemiga, kuid täpsuse suurendamiseks tuleb läbi viia rohkem katseid erinevate omadustega materjalidega.

Käesolev töö on edasi arendatav, kasutades mõõtmistel rohkem temperatuuri sensoreid ja viies läbi rohkem katseid parandustegurite leidmiseks. Soojusjuhtivuse automaatseks leidmiseks on loodud võimalus lisada juhtkontrollerisse jadasiin-ühenduse kaudu mikroarvuti millesse on programmeeritud automaatne andmetöötlussüsteem.

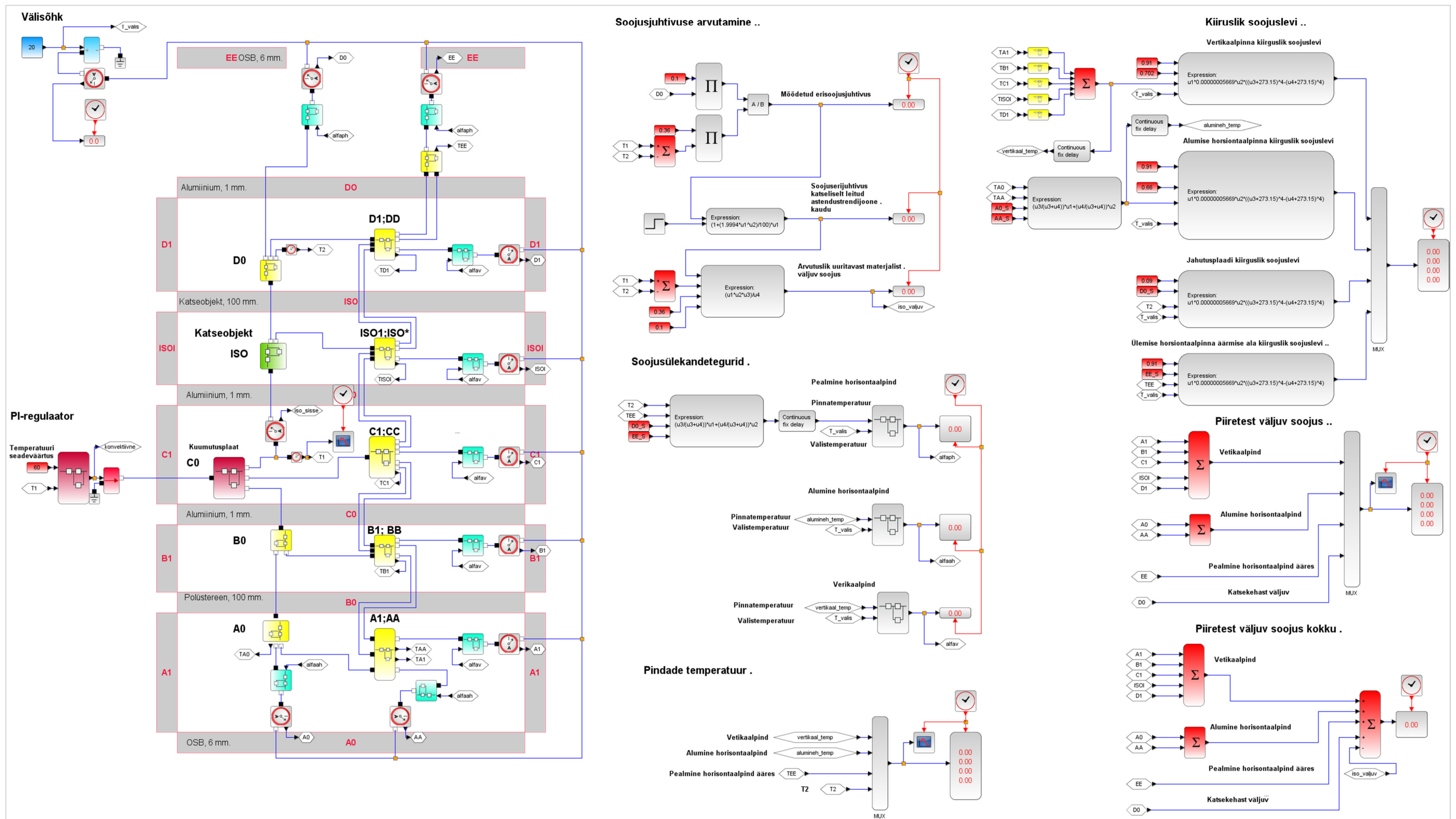
KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] **Holman J.P.** , Heat Transfer, 7th ed. , McGraw Hill Book Company, New York, 1990.
Kättesaadav: https://www.academia.edu/38166004/Heat_Transfer_10thEdition_by_JP_Holman.pdf, (03.05.2019), 759 lk.;
- [2] EVS-EN 12667:200, Eesti Standardikeskus, Kättesaadav: <https://www.evs.ee/tooted/evs-en-12667-2001>, (03.04.2019);
- [3] AS REIDENI PLAAT, polüstüreen plaadi EPS100 toimivusdeklaratsioon, Kättesaadav: <http://reideniplaat.ee/wp-content/uploads/Toimivusdeklar-EPS100-1.pdf>, (03.05.2019);
- [4] TENAPORS, polüstüreen plaadi EPS100 tehnilised andmed, Kättesaadav: http://tenapors.lv/uploads/Product/83/Produkta%20apraksts_Tenapors%20EPS_EE.pdf, (03.05.2019);
- [5] Probex OÜ, OSB plaadi füüsikalise-mehhaanilised omadused, Kättesaadav: <http://www.probex.ee/osb-est.html>, (03.05.2019);
- [6] Urmet OÜ, alumiiniumtoodete kataloog, Kättesaadav: <http://www.urmet.ee/wp-content/uploads/2017/11/Alumiinium.pdf>, (03.05.2019);
- [7] Eurostat Group, Kapton (polüamiid) teibi tooteleht, Kättesaadav: http://www.eurostatgroup.com/fr/produit/adhesifs-kapton_136, (03.05.2019);
- [8] Scilab Enterprises, Online kasutusjuhend, Kättesaadav: https://help.scilab.org/docs/5.5.2/en_US/section_9202932e4417ea3e4c85f7d45e089b65.html, (03.05.2019);
- [9] **Palge V.**, SOOJUSLEVI PROTSSESSIDE MODELLEERIMINE SCILAB'I KESKKONNAS, Eesti Maaülikool, Tallinna Tehnikaülikool, TARTU, TALLINN 2008, 94 lk.;
- [10] Scilab Enterprises, PID regulaator Kättesaadav: https://help.scilab.org/docs/5.5.2/en_US/PID.html, (03.05.2019);
- [11] **Naadel R.** Automaatjuhtimise alused, Tallinna Tehnikaülikool, Elektri- ja jõuelektroonika instituut, Tallinn 2006, 140 lk.;
- [12] **Talvari A.**, Soojusfüüsika alused: tehniline termodünaamika, soojuslühik. Sisekaitseakadeemia, Tallinn 2005, Kättesaadav: https://energiatalgud.ee/img_auth.php/3/36/Talvari%2C_A._Soojust%C3%BC%C3%BCsika_alused._%C3%95ppmaterjal2005.pdf, (03.05.2019), 130 lk.;
- [13] Skano põrandaalusplaadi tooteleht, Kättesaadav: http://www.skano.com/fibreboard/images/pdf/SKANO_underlay_EST-v2.pdf, (03.04.2019);
- [14] Bauroc AS, Materjalide tehnilised näitajad, <https://bauroc.ee/projekteerijale/tehnilised-naitajad/>, (03.05.2019);
- [15] MatWeb, Typical Deflection Temperatures and Melting Points of Polymers, Kättesaadav: <http://www.matweb.com/reference/deflection-temperature.aspx>, (03.05.2019);

- [16] **Galbraith J.**, Glass Thermal Properties and Their Role in Product Design, Kopp Glass 2015, Kättesaadav: <http://www.koppglass.com/blog/glass-thermal-properties-and-their-role-in-product-design/>, (03.05.2019);
- [17] Kanthal Sandvik Group, Kanthal takistustraatide tehnilise info kataloog, Kättesaadav: <https://www.kanthal.com/en/products/material-datasheets/strip/kanthal-a-1/?show=pdf>, (03.04.2019);
- [18] Adafruit, Adafruit INA219 Current Sensor Breakout, https://learn.adafruit.com/adafruit-ina219-current-sensor-breakout/downloads_ (03.05.2019);
- [19] Maxim Integrated Products, DS18B20 tehniline info, Kättesaadav: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>, (03.05.2019);
- [20] **Gillard G.** An introduction and tutorial for PID controllers, Kättesaadav: http://smithsrobot.weebly.com/uploads/6/0/9/5/60954939/pid_control_document.pdf (20.01.2019);
- [21] **Lazaridis G.**, PWM Modulation, PCB Heaven 2009, Kättesaadav: http://pcbheaven.com/wikipages/PWM_Modulation/ (20.01.2019);
- [22] Digikey tootekataloog, temperatuurisensori DS18B20 kasutamine, Kättesaadav: https://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/Makeblock%20PDFs/11014_Web.pdf (20.01.2019);
- [23] Arduino koduleht, PWM sageduse muutmine, Kättesaadav: <https://www.arduino.cc/en/Tutorial/SecretsOfArduinoPWM> (20.05.2019);
- [24] Adafruit, INA219 voolusensor, Kättesaadav: <https://cdn-learn.adafruit.com/downloads/pdf/adafruit-ina219-current-sensor-breakout.pdf?timestamp=1558808570>, (03.05.2019);
- [25] Adafruit, RTC DS1307 reaalaaja kellamoodul, Kättesaadav: <https://cdn-learn.adafruit.com/downloads/pdf/ds1307-real-time-clock-breakout-board-kit.pdf?timestamp=1558808555>, (03.05.2019);
- [26] Adafruit, SD kaardi moodul, Kättesaadav: <https://cdn-learn.adafruit.com/downloads/pdf/adafruit-micro-sd-breakout-board-card-tutorial.pdf?timestamp=1558808561>, (03.05.2019);
- [27] **Hareendran T.K.**, Atmega328P skeem, Electro Schematics, Kättesaadav: <https://www.electroschematics.com/10955/build-arduino-bootload-atmega-microcontroller-part-1/>, (03.05.2019);
- [28] Texas Instruments, Pingeregulaatori 7805, tehnilised andmed, Kättesaadav: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm7800.pdf>, (03.05.2019);
- [29] Texas Instruments, Pingeregulaatori LM317 skeem, Kättesaadav: <http://www.ti.com/general/docs/datasheetdiagram.tsp?genericPartNumber=LM317-N&diagramId=SNVS774P>, (03.05.2019);
- [30] Octopart, IRFZ44N tehniline dokumentatsioon, Kättesaadav: <https://datasheet.octopart.com/IRFZ44N-Inchange-Semiconductor-datasheet-15981338.pdf>, (03.05.2019).

LISAD

Lisa A. Soojusjuhtivuse ekspressmõõduri elektrilise aseskeemi mudel



Joonis A.1 Scilab Xcos keskkonnas modelleeritud materjali soojusjuhtivuse ekspressmõõuri soojulevi elektrilise aseskeemi mudel

Lisa B. Scilab Xcos modelleeringu lähtekood

//Magistri lõputöö, Materjali soojusjuhtivuse ekspressmõõtur, Ronald Kändla, 2019

//Vabakonveksiooni soojusülekandevadegurid
alfaph=11.74; *//Horisontaalne katsekambri peal*
alfaah=4.24; *//Horisontaalne katsekambri all*
alfav=8.17; *//Vertikaalne*

*//Materjalide soojusjuhtivused, W/(m*K)*
poly_soojusj=0.037; *//polüstüreen*
alu_soojusj=229; *//alumiinium*
ohk_soojusj=0.03; *//õhk*
osb_soojusj=0.13; *//OSB, puitlaastplaat*
polyamiid_soojusj=0.12; *//polüamiid*
taktraat_soojusj=11; *//takistustraata*
//Tundamtu/ uuritava materjali soojusjuhtivus
iso_soojusj=0.125;

*//Materjalide erisoojused, J/(kg*K)*
poly_eri=1000;
alu_eri=899;
ohk_eri=1100;
osb_eri=2720;
polyamiid_eri=1090;
taktraat_eri=600;

//Tundamtu materjali erisoojus
iso_eri=800;

//Materjalide tihedused, kg/m3
poly_tih=16;
alu_tih=2680;
ohk_tih=1.3;
osb_tih=510;
polyamiid_tih=1420;
taktraat_tih=7100;

//Tundamtu materjali tihedus
iso_tih=2600;

//A0 piirde, materjaliks OSB
A0_pikkus=0.6;
A0_laius=0.6;
A0_paksus=0.006;
A0_S=A0_pikkus*A0_laius;
A0_V=A0_S*A0_paksus;
A0_C=osb_tih*A0_V*osb_eri;

//A0 soojustakistused
R0_A0=1/((A0_S*osb_soojusj)/(A0_paksus*0.5));
R1_A0=1/((A0_S*osb_soojusj)/(A0_paksus*0.5));
R2_A0=1/(A0_S*alfaah);

//A1 ja A2 piire

//A0 piire, materjaliks OSB
A1_pikkus=2.4;
A1_laius=0.006;
A1_paksus=0.106;
A1_S=A1_pikkus*A1_laius;

A1v_pikkus=3.248;
A1v_laius=0.006;

Lisa B. järg

```
A1v_paksus=0.106;
A1v_S=A1v_pikkus*A1v_laius;

AA_paksus=0.006;
AA_S=0.812*0.812-A0_S;
AA_V=AA_S*AA_paksus;

A1_S=A1_pikkus*A0_laius;
A1_V=A1_S*A1_paksus;

AA_C=osb_tih*AA_V*osb_eri; //Soojusmahtuvus

//Soojustakistused

R0_A1=1/((A1_S*osb_soojusj)/(A1_paksus*0.5));
R1_A1=1/((A1_S*osb_soojusj)/(A1_paksus*0.5));
R2_A1=1/(A1_S*alfav);

R0_AA=1/((AA_S*osb_soojusj)/(AA_paksus*0.5));
R1_AA=1/((AA_S*osb_soojusj)/(AA_paksus*0.5));
R2_AA=1/(AA_S*alfaah);

//B0 piirde mõõdud
B0_pikkus=0.6;
B0_laius=0.6;
B0_paksus=0.1;

B0_S=B0_pikkus*B0_laius;
B0_V=B0_S*B0_paksus;
B0_C=poly_tih*B0_V*poly_eri;

//Soojustakistused
R0_B0=1/((B0_S*poly_soojusj)/(B0_paksus*0.5));
R1_B0=1/((B0_S*poly_soojusj)/(B0_paksus*0.5));

//B1 ja BB piire
B1_poly_pikkus=2.4;
B1v_poly_pikkus=3.2;
B1_osb_pikkus=3.2;
B1v_osb_pikkus=3.248;

B1_poly_laius=0.1;
B1v_poly_laius=0.1;
B1_osb_laius=0.1;
B1v_osb_laius=0.1;

B1_poly_paksus=0.1;
B1_osb_paksus=0.006;
BB_poly_paksus=0.1;
BB_osb_paksus=0.1;

B1_poly_S=B1_poly_pikkus*B1_poly_laius;
B1v_poly_S=B1v_poly_pikkus*B1v_poly_laius;
B1_osb_S=B1_osb_pikkus*B1_osb_laius;
B1v_osb_S=B1v_osb_pikkus*B1v_osb_laius;
BB_poly_S=0.8*0.8-0.6*0.6;
BB_osb_S=0.812*0.812-0.8*0.8;
43
BB_poly_V=BB_poly_S*0.1;
BB_osb_V=BB_osb_S*0.1;

BB_poly_C=poly_tih*BB_poly_V*poly_eri;
BB_osb_C=osb_tih*BB_poly_V*osb_eri;
```

Lisa B. järg

//Soojustakistused

```
R0_B1=1/((B1_poly_S*poly_soojusj)/(B1_poly_paksus*0.5));
R1_B1=1/((B1v_poly_S*poly_soojusj)/(B1_poly_paksus*0.5));
R2_B1=1/((B1_osb_S*osb_soojusj)/(B1_osb_paksus*0.5));
R3_B1=1/((B1v_osb_S*osb_soojusj)/(B1_osb_paksus*0.5));
R4_B1=1/(B1v_osb_S*alfav);

R0_poly_BB=1/((BB_poly_S*poly_soojusj)/(BB_poly_paksus*0.5));
R1_poly_BB=1/((BB_poly_S*poly_soojusj)/(BB_poly_paksus*0.5));

R0_osb_BB=1/((BB_osb_S*osb_soojusj)/(BB_osb_paksus*0.5));
R1_osb_BB=1/((BB_osb_S*osb_soojusj)/(BB_osb_paksus*0.5));
```

//C piire

```
C0_pikkus=0.6;
C0_laius=0.6;
C0_paksus=0.003;

C0_S=B0_pikkus*C0_laius;
C0_V=C0_S*C0_paksus;
C0_C=alu_tih*C0_V*alu_eri;
```

//Soojustakistused

```
R0_C0=1/((C0_S*alu_soojusj)/(C0_paksus*0.5));
R1_C0=1/((C0_S*alu_soojusj)/(C0_paksus*0.5));
```

//C1 ja CC piire

```
C1_poly_pikkus=2.4;
C1v_poly_pikkus=3.2;
C1_osb_pikkus=3.2;
C1v_osb_pikkus=3.248;

C1_poly_laius=0.003;
C1v_poly_laius=0.003;
C1_osb_laius=0.003;
C1v_osb_laius=0.003;

C1_poly_paksus=0.1;
C1_osb_paksus=0.006;
CC_poly_paksus=0.003;
CC_osb_paksus=0.003;

C1_poly_S=C1_poly_pikkus*C1_poly_laius;
C1v_poly_S=C1v_poly_pikkus*C1v_poly_laius;
C1_osb_S=C1_osb_pikkus*C1_osb_laius;
C1v_osb_S=C1v_osb_pikkus*C1v_osb_laius;
CC_poly_S=0.8*0.8-0.6*0.6;
CC_osb_S=0.812*0.812-0.8*0.8;

CC_poly_V=CC_poly_S*0.003;
CC_osb_V=CC_osb_S*0.003;

CC_poly_C=poly_tih*CC_poly_V*poly_eri;
CC_osb_C=osb_tih*CC_poly_V*osb_eri;
```

//Soojustakistused

```
R0_C1=1/((C1_poly_S*poly_soojusj)/(C1_poly_paksus*0.5));
R1_C1=1/((C1v_poly_S*poly_soojusj)/(C1_poly_paksus*0.5));
R2_C1=1/((C1_osb_S*osb_soojusj)/(C1_osb_paksus*0.5));
R3_C1=1/((C1v_osb_S*osb_soojusj)/(C1_osb_paksus*0.5));
R4_C1=1/(C1v_osb_S*alfav);
```

Lisa B. järg

```
R0_poly_CC=1/((CC_poly_S*poly_soojusj)/(CC_poly_paksus*0.5));
R1_poly_CC=1/((CC_poly_S*poly_soojusj)/(C1_poly_paksus*0.5));

R0_osb_CC=1/((CC_osb_S*osb_soojusj)/(CC_osb_paksus*0.5));
R1_osb_CC=1/((CC_osb_S*osb_soojusj)/(C1_osb_paksus*0.5));

//ISO piire, uuritav objekt
ISO_pikkus=0.6;
ISO_laius=0.6;
ISO_paksus=0.1;
ISO_S=ISO_pikkus*ISO_laius;
ISO_V=ISO_S*ISO_paksus;
ISO_C=iso_tih/ISO_V/iso_eri;

//Soojustakistused
R0_ISO=1/((ISO_S*iso_soojusj)/(ISO_paksus*0.5));
R1_ISO=1/((ISO_S*iso_soojusj)/(ISO_paksus*0.5));

//ISO1 piire
ISO_poly_pikkus=2.4;
ISOv_poly_pikkus=3.2;
ISO_osb_pikkus=3.2;
ISOv_osb_pikkus=3.248;

ISO_poly_laius=0.1;
ISOv_poly_laius=0.1;
ISO_osb_laius=0.1;
ISOv_osb_laius=0.1;

ISO_poly_paksus=0.1;
ISO_osb_paksus=0.006;
ISO1_poly_paksus=0.1;
ISO1_osb_paksus=0.1;

ISO_poly_S=ISO_poly_pikkus*ISO_poly_laius;
ISOv_poly_S=ISOv_poly_pikkus*ISOv_poly_laius;
ISO_osb_S=ISO_osb_pikkus*ISO_osb_laius;
ISOv_osb_S=ISOv_osb_pikkus*ISOv_osb_laius;

ISO1_poly_S=0.8*0.8-0.6*0.6;
ISO1_osb_S=0.812*0.812-0.8*0.8;

ISO1_poly_V=ISO1_poly_S*0.1;
ISO1_osb_V=ISO1_osb_S*0.1;

ISO1_poly_C=poly_tih*ISO1_poly_V*poly_eri;
ISO1_osb_C=osb_tih*ISO1_osb_V*osb_eri;

//Soojustakistused
R0_ISO1=1/((ISO_poly_S*poly_soojusj)/(ISO_poly_paksus*0.5));
R1_ISO1=1/((ISOv_poly_S*poly_soojusj)/(ISO_poly_paksus*0.5));
R2_ISO1=1/((ISO_osb_S*osb_soojusj)/(ISO_osb_paksus*0.5));
R3_ISO1=1/((ISOv_osb_S*osb_soojusj)/(ISO_osb_paksus*0.5));
R4_ISO1=1/(ISOv_osb_S*alfav);

R0_poly_ISO1=1/((ISO1_poly_S*poly_soojusj)/(ISO1_poly_paksus*0.5));
R1_poly_ISO1=1/((ISO1_poly_S*poly_soojusj)/(ISO1_poly_paksus*0.5));

R0_osb_ISO1=1/((ISO1_osb_S*osb_soojusj)/(ISO1_osb_paksus*0.5));
R1_osb_ISO1=1/((ISO1_osb_S*osb_soojusj)/(ISO1_osb_paksus*0.5));

//D0 piire
D0_pikkus=0.6;
D0_laius=0.6;
```

Lisa B. järg

```
D0_paksus=0.001;
D0_S=D0_pikkus*D0_laius;
D0_V=D0_S*D0_paksus;
D0_C=alu_tih*D0_V*alu_eri;

//Soojustakistused
R0_D0=1/((D0_S*alu_soojusj)/(D0_paksus*0.5));
R1_D0=1/((D0_S*alu_soojusj)/(D0_paksus*0.5));
R2_D0=1/(D0_S*alfaph);

//D1 ja DD piire
D1_poly_pikkus=2.4;
D1v_poly_pikkus=3.2;
D1_osb_pikkus=3.2;
D1v_osb_pikkus=3.248;

D1_poly_laius=0.001;
D1v_poly_laius=0.001;
D1_osb_laius=0.001;
D1v_osb_laius=0.001;;

D1_poly_paksus=0.1;
D1_osb_paksus=0.006;
DD_poly_paksus=0.001;
DD_osb_paksus=0.001;

D1_poly_S=D1_poly_pikkus*D1_poly_laius;
D1v_poly_S=D1v_poly_pikkus*D1v_poly_laius;
D1_osb_S=D1_osb_pikkus*D1_osb_laius;
D1v_osb_S=D1v_osb_pikkus*D1v_osb_laius;
DD_poly_S=0.8*0.8-0.6*0.6;
DD_osb_S=0.812*0.812-0.8*0.8;

DD_poly_V=DD_poly_S*0.003;
DD_osb_V=DD_osb_S*0.003;
DD_poly_C=poly_tih*DD_poly_V*poly_eri;
DD_osb_C=osb_tih*DD_poly_V*osb_eri;

//Soojustakistus
R0_D1=1/((D1_poly_S*poly_soojusj)/(D1_poly_paksus*0.5));
R1_D1=1/((D1v_poly_S*poly_soojusj)/(D1_poly_paksus*0.5));
R2_D1=1/((D1_osb_S*osb_soojusj)/(D1_osb_paksus*0.5));
R3_D1=1/((D1v_osb_S*osb_soojusj)/(D1_osb_paksus*0.5));
R4_D1=1/(D1v_osb_S*alfav);

R0_poly_DD=1/((DD_poly_S*poly_soojusj)/(DD_poly_paksus*0.5));
R1_poly_DD=1/((DD_poly_S*poly_soojusj)/(DD_poly_paksus*0.5));

R0_osb_DD=1/((DD_osb_S*osb_soojusj)/(DD_osb_paksus*0.5));
R1_osb_DD=1/((DD_osb_S*osb_soojusj)/(DD_osb_paksus*0.5));

//E piire
E0_pikkus=0.6;
E0_laius=0.6;
E0_paksus=0.006;
E0_S=E0_pikkus*E0_laius;
E0_V=E0_S*E0_paksus;
E0_C=osb_tih*E0_V*osb_eri;

//Soojustakistused
R0_E0=1/((E0_S*osb_soojusj)/(E0_paksus*0.5));
R1_E0=1/((E0_S*osb_soojusj)/(E0_paksus*0.5));
R2_E0=1/(E0_S*alfaph);
```

Lisa B. järg

//E1 ja EE püire

```
E1_pikkus=2.4;
E1_laius=0.006;
E1_paksus=0.106;
E1v_pikkus=3.248;
E1v_laius=0.006;
E1v_paksus=0.106;
EE_paksus=0.006;

E1_S=E1_pikkus*E1_laius;
E1v_S=E1v_pikkus*E1v_laius;
EE_S=0.812*0.812-E0_S;

EE_V=EE_S*EE_paksus;
EE_C=osb_tih*EE_V*osb_eri;
```

//Soojustakistused

```
R0_E1=1/((E1_S*osb_soojusj)/(E1_paksus*0.5));
R1_E1=1/((E1v_S*osb_soojusj)/(E1v_paksus*0.5));
R2_E1=1/(E1v_S*alfav);

R0_EE=1/((EE_S*osb_soojusj)/(EE_paksus*0.5));
R1_EE=1/((EE_S*osb_soojusj)/(EE_paksus*0.5));
R2_EE=1/(EE_S*alfav);
```

//Õhukiht katsekeha all ja peal, 0,1 mm.

```
ohk_S=0.36*0.36;
ohk_paksus=0.0001;
ohk_V=ohk_S*ohk_paksus;
ohk_C=ohk_eri*ohk_tih*ohk_V;
R_ohk=1/((ohk_S*ohk_soojusj)/(ohk_paksus));

R0_poly_ISOI=1/((ISOI_poly_S*poly_soojusj)/(ISOI_poly_paksus*0.5));
R1_poly_ISOI=1/((ISOI_poly_S*poly_soojusj)/(ISOI_poly_paksus*0.5));

R0_osb_ISOI=1/((ISOI_osb_S*osb_soojusj)/(ISOI_osb_paksus*0.5));
R1_osb_ISOI=1/((ISOI_osb_S*osb_soojusj)/(ISOI_osb_paksus*0.5));
```

//D0 püire

```
D0_pikkus=0.6;
D0_laius=0.6;
D0_paksus=0.001;
D0_S=D0_pikkus*D0_laius;
D0_V=D0_S*D0_paksus;
D0_C=alu_tih*D0_V*alu_eri;
```

//Soojustakistused

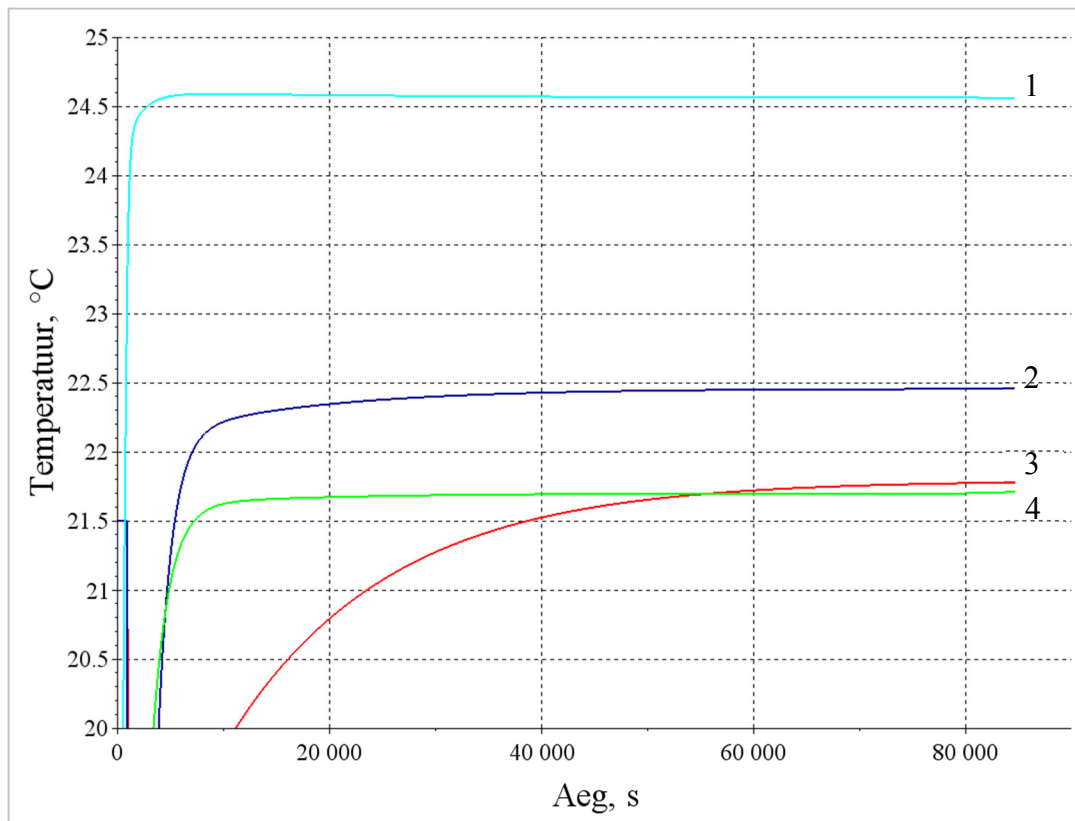
```
R0_D0=1/((D0_S*alu_soojusj)/(D0_paksus*0.5));
R1_D0=1/((D0_S*alu_soojusj)/(D0_paksus*0.5));
```

//D1 ja DD püire

```
D1_poly_pikkus=2.4;
D1v_poly_pikkus=3.2;
D1_osb_pikkus=3.2;
D1v_osb_pikkus=3.248;

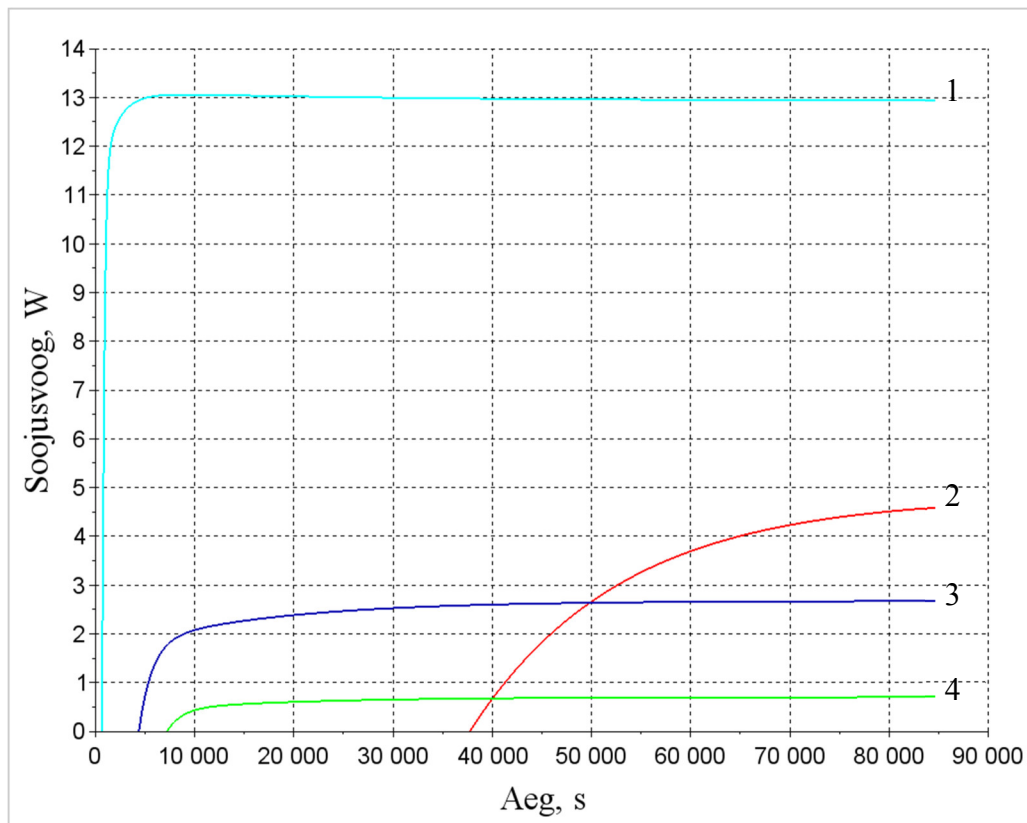
D1_poly_laius=0.001;
```

Lisa C. Scilabis modelleeritud simulatsiooni tulemused



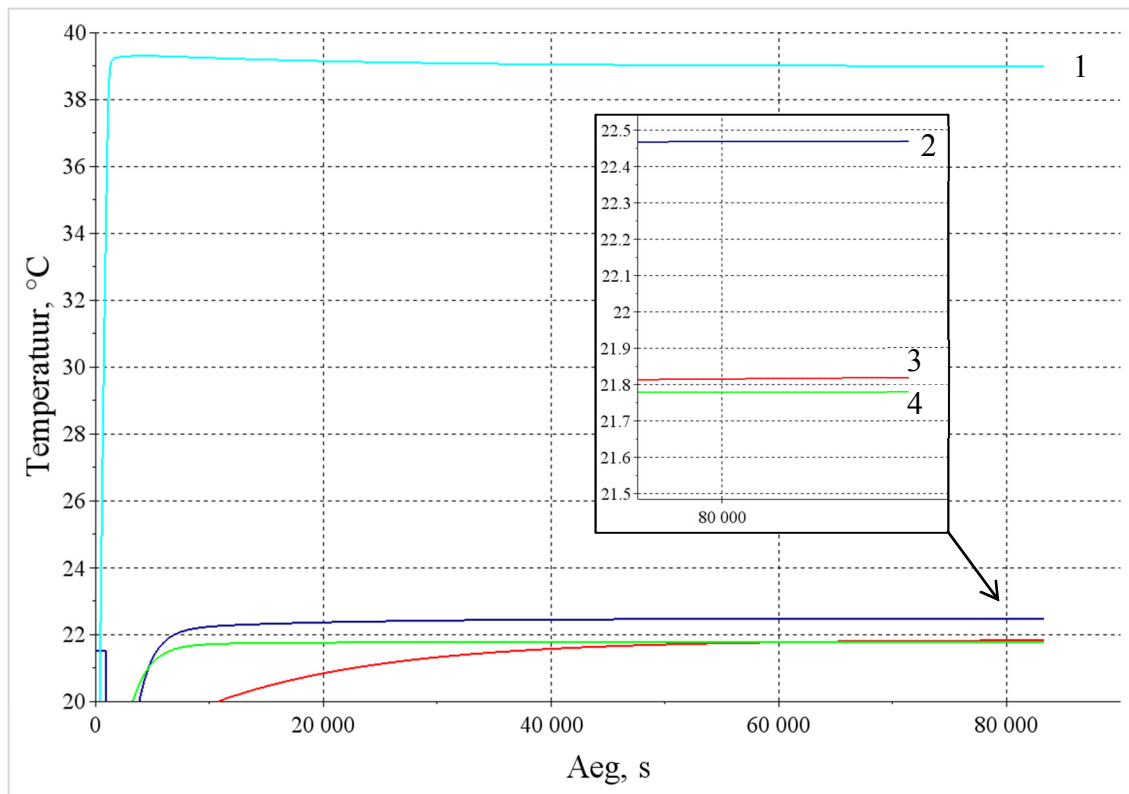
Joonis C.1 Scilabis modelleeritud soojusjuhtivuse ekspressmõõduri soojuslevi simulatsiooni tulemused, uuritava objekti soojusjuhtivus $0,11 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, temperatuur: 1) uuritava materjali pealmise pinna temperatuur (T_2); 2) alumise horisontaalpinna kaalutud keskmine temperatuur; 3) vertikaalpinna kaalutud keskmine temperatuur; 4) pealmise horisontaalpinna ääre temperatuur (EE).

Lisa C. järg



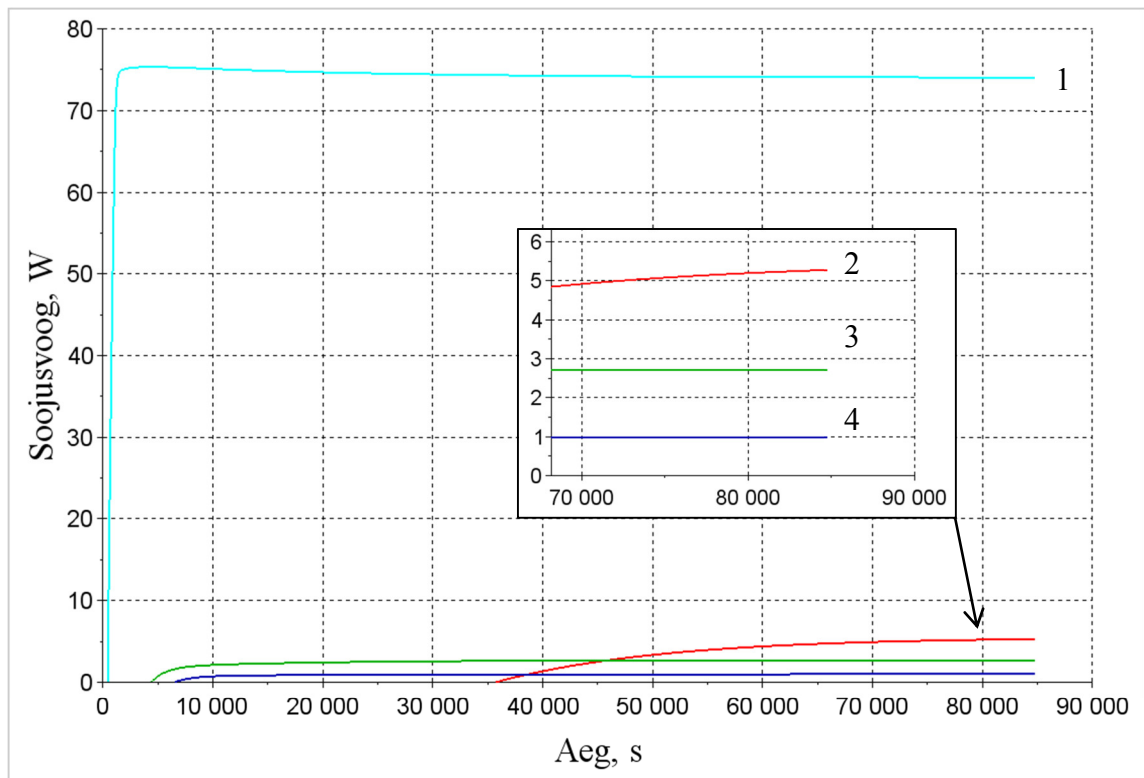
Joonis C.2 Scilabis modelleeritud soojusjuhtivuse ekspressmõõduri soojuslevi simulatsiooni tulemused, uuritava objekti soojusjuhtivus $0,11 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, soojusvoog: 1) uuritavast materjalist väljuv soojusvoog; 2) vertikaalpinnast väljuv soojusvoog; 3) alumisest horisontaalpinnast väljuv soojusvoog; 4) pealmise horisontaalpinna äärest väljuv soojusvoog.

Lisa C. järg



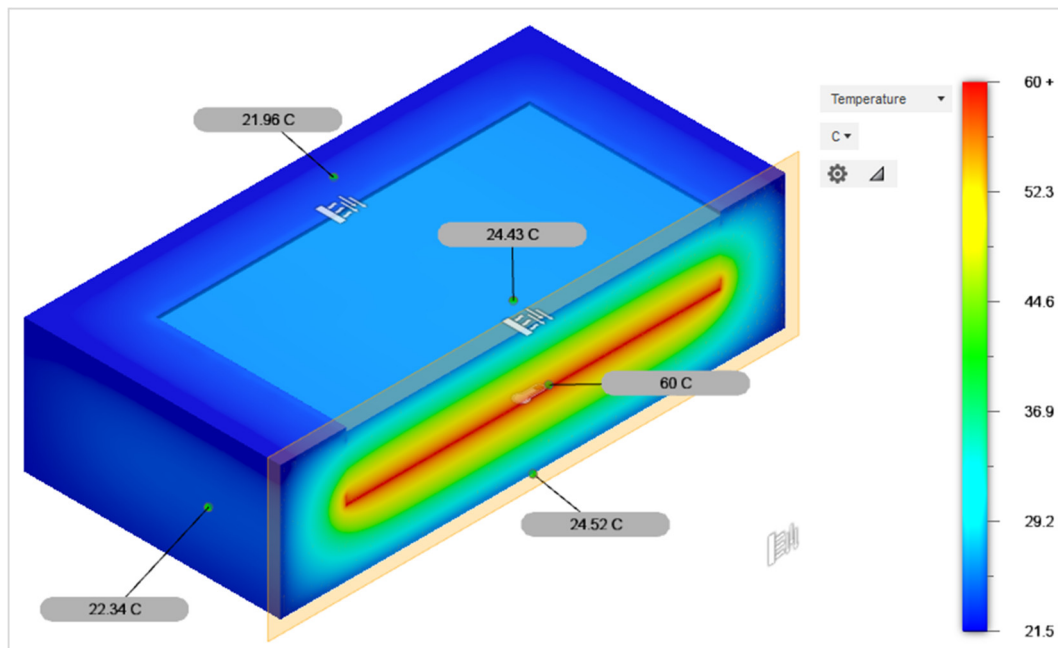
Joonis C.3 Scilabis modelleeritud soojusjuhtivuse ekspressmõõduri soojuslevi simulatsiooni tulemused, uuritava objekti soojusjuhtivus $1 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, temperatuur: 1) uuritava materjali pealmise pinna temperatuur (T_2); 2) vertikaalpinna kaalutud keskmine temperatuur; 3) pealmise horisontaalpinna temperatuur (EE); 4) alumise horisontaalpinna kaalutud keskmine temperatuur.

Lisa C. järg

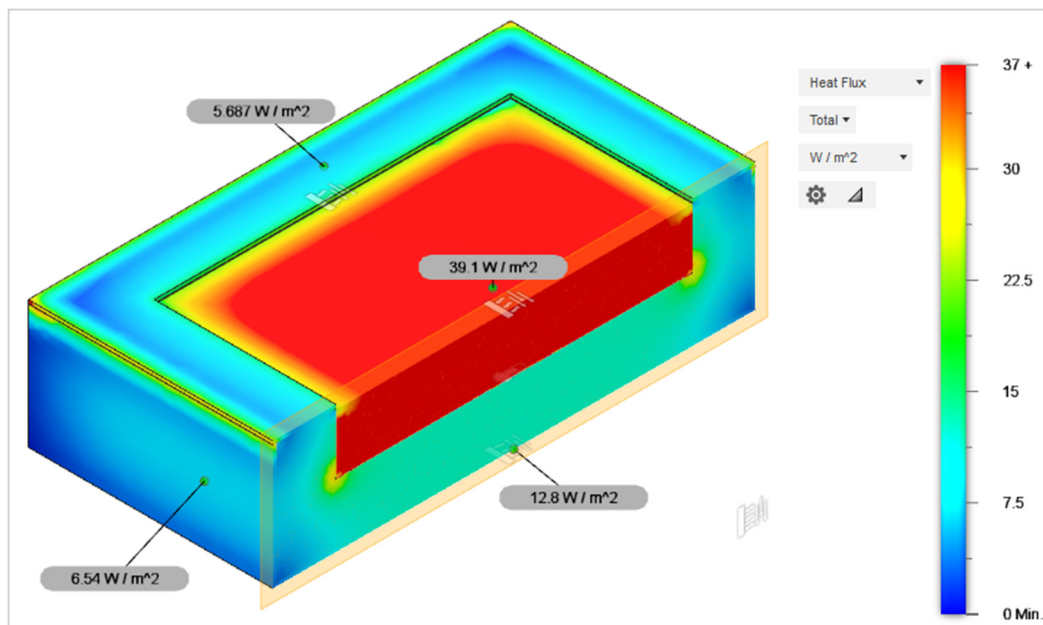


Joonis C.4 Scilabis modelleeritud soojusjuhtivuse ekspressmõõduri soojuslevi simulatsiooni tulemused, uuritava objekti soojusjuhtivus $1 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, soojusvoog: 1) uuritavast materjalist väljuv soojusvoog; 2) vertikaalpinnast väljuv soojusvoog; 3) pealmise horisontaalpinna äärest väljuv soojusvoog; 4) alumisest horisontaalpinnast väljuv soojusvoog.

Lisa D. Fusion 360 modelleeritud simulatsiooni tulemused

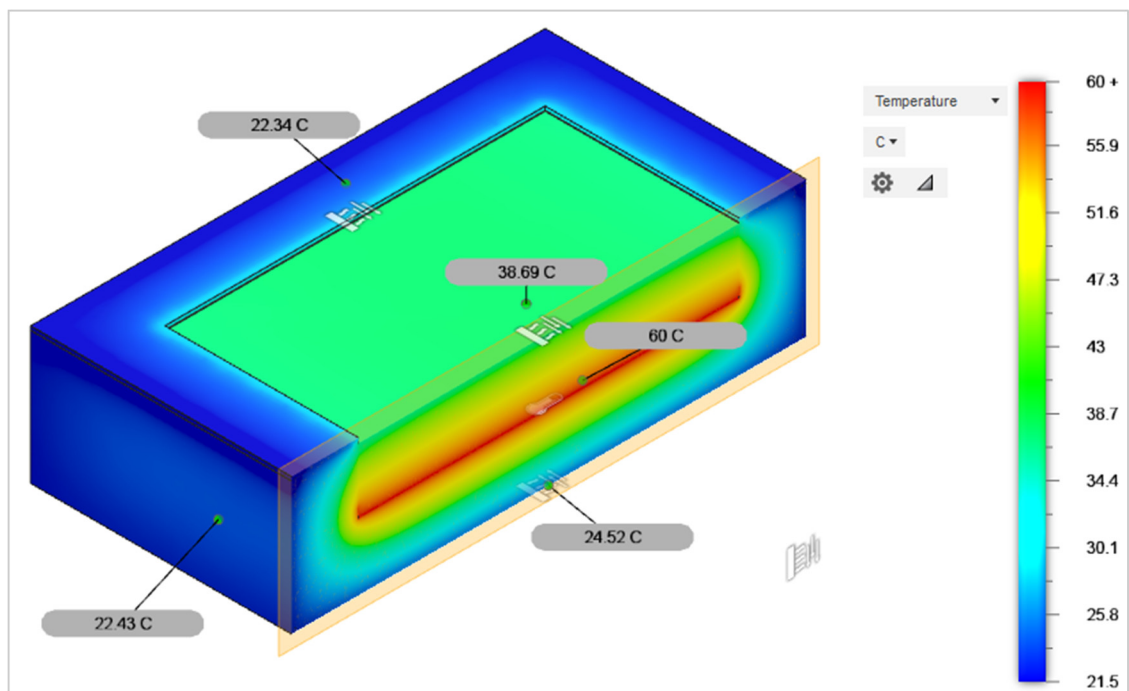


Joonis D.1 Temperatuurivälja modelleerimise tulemused keskkonnas Fusion 360, uuritava objekti soojusjuhtivus $0,11 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, temperatuur.

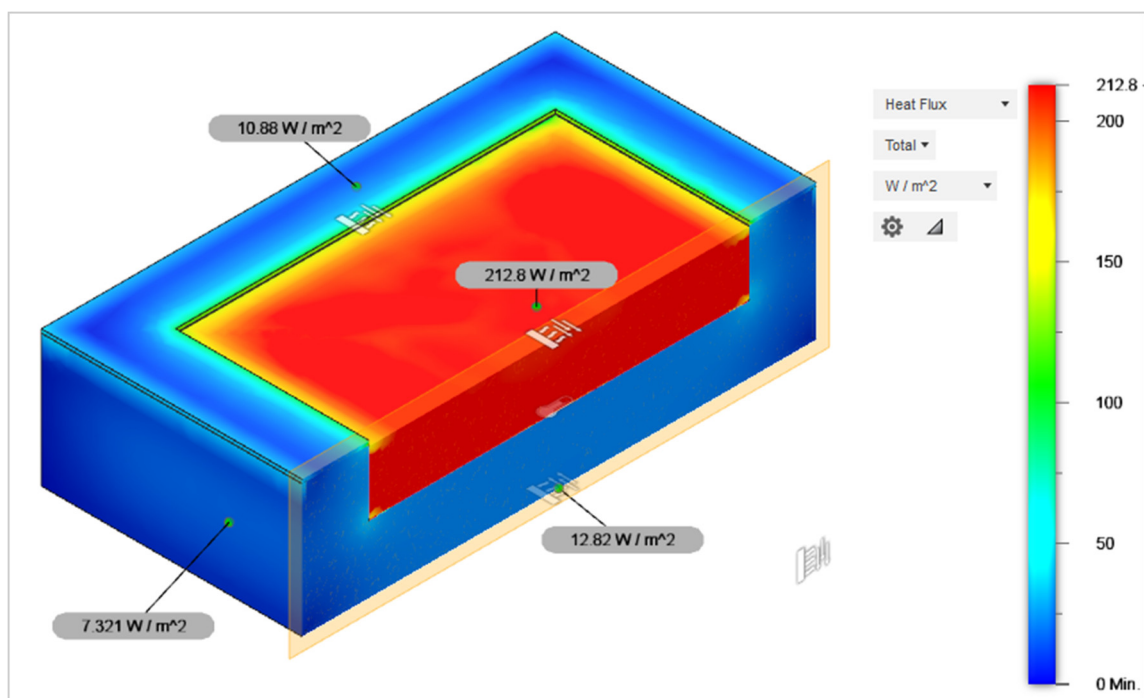


Joonis D.2 Soojusvoo jaotuse modelleerimise tulemused keskkonnas Fusion 360, uuritava objekti soojusjuhtivus $0,11 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, soojusvoog.

Lisa D. järg



Joonis D.3 Temperatuurivälja modelleerimise tulemused keskkonnas Fusion 360, uuritava objekti soojusjuhtivus $1 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, temperatuur.



Joonis D.4 Soojusvoo jaotuse modelleerimise tulemused keskkonnas Fusion 360, uuritava objekti soojusjuhtivus $1 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, soojusvoog.

Lisa E. Kontrolleri lähtekood

Kontrolleri lähtekood [20-29]

```
#include <Wire.h> //Teek I2C ühenduse loomiseks
#include <EEPROM.h> //Mälu aja meelde jätmiseks

//Reaalkellaaja mooduli teeid
#include "RTClib.h"
RTC_DS1307 RTC;
#include <Adafruit_INA219.h> //Voolusensori lisamine

// Kolme voolusensori aadress I2C ühenduseks
Adafruit_INA219 ina219_A(0x40);
Adafruit_INA219 ina219_B(0x44);
Adafruit_INA219 ina219_C(0x41);

//SD kaardi mooduli teegid
#include <SPI.h>
#include <SD.h>
int pinCS = 4; //CS pin
File fail; //Logimisfaili muutuja määramine
#include <movingAvg.h> //Liikuva keskmise teek

//Sätestame liikuva keskmise voolutugevuse mõõtmisel 10 mõõtetulemuse kaupa
movingAvg inavool(10);

//OneWire teek, temperatuurianduri kalibreerimisinfo ning võimalus ühendada andurid järjestiku
#include <OneWire.h>
//Temperatuuri anduri teek
#include <DallasTemperature.h>

//Temperatuuri anduri ühendus D2
#define ONE_WIRE_BUS 2

//Võimalik ühendada juurde veel temperatuuri andureid
OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);
DallasTemperature temp_sensorid(&oneWire);

// DS18B20 aadressid
uint8_t sensor1[8] = { 0x28, 0xFF, 0x20, 0x63, 0x53, 0x14, 0x01, 0xBE };
uint8_t sensor7[8] = { 0x28, 0xFF, 0x5A, 0xE5, 0x51, 0x14, 0x00, 0xAF };
uint8_t sensor15[8] = { 0x28, 0xFF, 0x27, 0xBD, 0x53, 0x14, 0x01, 0xFB };
uint8_t sensor3[8] = { 0x28, 0xFF, 0xF8, 0xCE, 0x62, 0x14, 0x03, 0x23 };
uint8_t sensor6[8] = { 0x28, 0xFF, 0x52, 0x1C, 0x68, 0x14, 0x04, 0x42 };
uint8_t sensor11[8] = { 0x28, 0xFF, 0xDE, 0x17, 0x68, 0x14, 0x04, 0x3C };
uint8_t sensor12[8] = { 0x28, 0xFF, 0x65, 0xDD, 0x51, 0x14, 0x00, 0x10 };
uint8_t sensor14[8] = { 0x28, 0xFF, 0x47, 0x65, 0x53, 0x14, 0x01, 0xF7 };
uint8_t sensor17[8] = { 0x28, 0xFF, 0xDF, 0x64, 0x53, 0x14, 0x01, 0xF1 };
uint8_t sensor18[8] = { 0x28, 0xD5, 0x78, 0x96, 0x0A, 0x00, 0x00, 0xE0 };

//Muutujad
//Kuumutusplaadi temp. sensorid
float temp1;
float temp2;
float temp3;
//Jahutusplaadi temp. sensorid
float temp4;
float temp5;
float temp6;
```

Lisa E. järg

```
//PI konstandid
int kp = 180; //Võimendustegur
int ki = 12; //Integralli ajakonstant
//P ja I komponendi muutujad
int PI_p = 0;
int PI_i = 0;

int seade_vaartus=60; //Kuumutusplaadi temperatuuri seadeväärtus

void setup(){

pinMode(pinCS, OUTPUT); //SD kaardi väljund

/*Kui SD kaart on sisestatud siis ajalise viite jooksul algab kontrolleri
 * tööprotsess, vastasel juhul jääb kontrolleri ooterežiimile*/
if (SD.begin())
    {delay(600);} else
    {delay(1000);
    return;}
//Faili avamine või loomine
fail = SD.open("test.txt", FILE_WRITE);
//Kirjutatakse tekstifailis iga mõõtmise algusesse
fail.println("Uus mõõtmine algab"); |
fail.close();

Wire.begin(); //I2C ühendusel loomine
RTC.begin(); //Kellamoodulilt aja lugemine
if (! RTC.isrunning()) //kellaaja sünkroniseerimine arvuti kellaajaga
{RTC.adjust(DateTime(__DATE__, __TIME__));}

pinMode(PWM,OUTPUT); //PWM väljund D3 Atmel328P kontrolleri
inavool.begin(); //Voolude mõõtmise alustamine

TCCR2B = TCCR2B & B11111000 | B00000010; /* PWM sageduse muutmine,
B00000010=3921.16 Hz, ilma seadistamata 490.2 HZ*/
Serial.begin(9600); //Jadasiin ühenduse loomine
temp_sensorid.begin(); //Temperatuuri mõõtmise algus
//Seina temp sensorid
float ahorisontaalt; //Alumise horisontaalpinna temperatuur
float vertikaalt; //Vertikaalpinna temperatuur
float valist; //Väline temperatuur
float phorisontaalt; //Pealmise horisontaalpinna temperatuur

float kuumtemp; //kuumutusplaadi temperatuur
float kylmtemp; //jahutusplaadi temperatuur

//Voolutugevusega seotud muutujad
float vool;
int voolutugevus;
int ina1;
int ina2;
int ina3 ;

int PWM = 3; //Pulsilaiusmodulatsioon, väljund

//Muutujad
int soov_temperatuur = 0;
float PI_vahe = 0;
int PI_summa = 0;
float temperatuur;
```


Lisa E. järg

```
// Voolusensorite mõõtmine algus väikese ajalise vahega
delay(10);
ina219_A.begin();
delay(10);
ina219_B.begin();
delay(10);
ina219_C.begin();|
delay(10);
}

void loop() {
// Voolusensorite mõõtmine väikese ajalise vahega
ina1=ina219_A.getCurrent_mA();
delay(10);
ina2=ina219_B.getCurrent_mA();
delay(10);
ina3=ina219_C.getCurrent_mA();
delay(10);

//Kolme sensoriga mõõdetud voolutugevus kokku
voolutugevus=ina1+ina2+ina3;

// Esmalt mõõdame temperatuurid
temp_sensorid.requestTemperatures();

if (temp4<0)
{ temp4=temp5;}
if (temp5<0)
{temp5=temp6;}
if (temp6<0)
{temp4=temp1;}

kuumtemp=((temp1+temp2+temp3)/3); //Kuumutusplaadi keskmine temperatuur
kylmtemp=((temp4+temp5+temp6)/3); //Jahutusplaadi keskmine temperatuur
/*Aja konstandi piiramine temperatuuri reguleerimise alguses, ei lase
kuumutusplaadi temperatuuril tõusta üle 1 °C seadeväärtusest*/
if (kuumtemp>(seade_vaartus+1))
{PI_i=0;}

//Järgmisena kalkuleerime soovitud temperatuuri ja reaalse temperatuuri vahe
PI_vahe = seade_vaartus - (kuumtemp);

//Leiame P summa kus kp on kordajaks nn, konstant
PI_p = kp * PI_vahe;
```


Lisa E. järg

```
//Leiab PI_i kui temperatuur erineb pluss-miinus 3 kraadi
if(-3 < PI_vahe <3)

{PI_i=PI_i+(ki * PI_vahe);}

//Määrame ära, et integrali ajakonstant ei saaks olla väiksem kui 0
if(PI_i < 0)
{ PI_i = 0; }

PI_summa = PI_p + PI_i; //PI summa mille põhjal toimub reguleerimine

//PWM vahe defineerimine, maksimaalne DC 50%/ pool võimsusest
if(PI_summa < 0)
{ PI_summa = 0; }
if(PI_summa > 128)
{ PI_summa = 128; }

//Liikuva keskmise voolutugevuse omistamine keskmist arvutavale algoritmile
float ina=inavool.reading(voolutugevus);
temp1= temp_sensorid.getTempC(sensor3);
temp2= temp_sensorid.getTempC(sensor14);
temp3= temp_sensorid.getTempC(sensor17);

temp4= temp_sensorid.getTempC(sensor6);
temp5= temp_sensorid.getTempC(sensor11);
temp6= temp_sensorid.getTempC(sensor12);

ahorisontaalt= temp_sensorid.getTempC(sensor1);
vertikaalt= temp_sensorid.getTempC(sensor7);
valist= temp_sensorid.getTempC(sensor15);
phorisontaalt= temp_sensorid.getTempC(sensor18);

//Temperatuuriandurite häiringu puhul,et ei kuvataks -127

if (temp1<0)
{temp1=temp2;}
if (temp2<0)
{temp2=temp3;}
if (temp3<0)
{temp3=temp1;}

//Jadasiin ühendusega väljastatavad väärtused
Serial.print(kuumtemp); //Kuumutusplaadi temperatuur
Serial.print(","); //Koma lisamine väärtuste vahele
Serial.print(kylmtemp); // Jahutusplaadi temperatuur
Serial.print(",");
Serial.print(valist); // Väliskeskkonna temperatuur
Serial.print(",");
Serial.print(ahorisontaalt); //Alumise horisontaalpinna temperatuur
Serial.print(",");
Serial.print(vertikaalt); //Vertikaalpinna temperatuur
Serial.print(",");
Serial.print(phorisontaalt); //Pealise horisontaalpinna temperatuur
Serial.print(",");
Serial.print(ina*-1); //Voolutugevuse väljastamine ilma keskmist arvutamata
Serial.print(",");
Serial.println(voolutugevus*-1); //Liikuva keskmise voolutugevuse väljastamine
```

Lisa E. järg

```
//SD kaardile andmete salvestamine
fail = SD.open("test.txt", FILE_WRITE);
//Analoogselt jadasiin ühendusega väljastatavad väärtused + kellaaeg RTC moodulist
if (fail) {
    DateTime now = RTC.now();

    DateTime now = RTC.now();
    fail.print(now.hour(), DEC);
    fail.print(':');
    fail.print(now.minute(), DEC);
    fail.print(':');
    fail.print(now.second(), DEC);
    fail.print(",");
    fail.print(kuumtemp);
    fail.print(",");
    fail.print(kylmtemp);
    fail.print(",");
    fail.print(valist);
    fail.print(",");
    fail.print(ahorisontaalt);
    fail.print(",");
    fail.print(vertikaalt);
    fail.print(",");
    fail.print(phorisontaalt);
    fail.print(",");
    fail.print(ina*-1);
    fail.print(",");
    fail.println(voolutugevus*-1);
    fail.close(); // close the file
}

//PWM 3 väärtuse saatmine IRFZ44N transistorite lülitamiseks
analogWrite(PWM, PI_summa);
delay (10);
}
```

Lisa F. Kuiva õhu füüsikalised omadused

Tabel F. Kuiva õhu füüsikalised omadused[1]

Table A-5 | Properties of air at atmospheric pressure.[†]

The values of μ , k , c_p , and Pr are not strongly pressure-dependent and may be used over a fairly wide range of pressures							
T, K	ρ kg/m ³	c_p kJ/kg · °C	$\mu \times 10^5$ kg/m · s	$\nu \times 10^6$ m ² /s	k W/m · °C	$\alpha \times 10^4$ m ² /s	Pr
100	3.6010	1.0266	0.6924	1.923	0.009246	0.02501	0.770
150	2.3675	1.0099	1.0283	4.343	0.013735	0.05745	0.753
200	1.7684	1.0061	1.3289	7.490	0.01809	0.10165	0.739
250	1.4128	1.0053	1.5990	11.31	0.02227	0.15675	0.722
300	1.1774	1.0057	1.8462	15.69	0.02624	0.22160	0.708
350	0.9980	1.0090	2.075	20.76	0.03003	0.2983	0.697
400	0.8826	1.0140	2.286	25.90	0.03365	0.3760	0.689
450	0.7833	1.0207	2.484	31.71	0.03707	0.4222	0.683
500	0.7048	1.0295	2.671	37.90	0.04038	0.5564	0.680
550	0.6423	1.0392	2.848	44.34	0.04360	0.6532	0.680
600	0.5879	1.0551	3.018	51.34	0.04659	0.7512	0.680
650	0.5430	1.0635	3.177	58.51	0.04953	0.8578	0.682
700	0.5030	1.0752	3.332	66.25	0.05230	0.9672	0.684
750	0.4709	1.0856	3.481	73.91	0.05509	1.0774	0.686
800	0.4405	1.0978	3.625	82.29	0.05779	1.1951	0.689
850	0.4149	1.1095	3.765	90.75	0.06028	1.3097	0.692
900	0.3925	1.1212	3.899	99.3	0.06279	1.4271	0.696
950	0.3716	1.1321	4.023	108.2	0.06525	1.5510	0.699
1000	0.3524	1.1417	4.152	117.8	0.06752	1.6779	0.702
1100	0.3204	1.160	4.44	138.6	0.0732	1.969	0.704
1200	0.2947	1.179	4.69	159.1	0.0782	2.251	0.707
1300	0.2707	1.197	4.93	182.1	0.0837	2.583	0.705
1400	0.2515	1.214	5.17	205.5	0.0891	2.920	0.705
1500	0.2355	1.230	5.40	229.1	0.0946	3.262	0.705
1600	0.2211	1.248	5.63	254.5	0.100	3.609	0.705
1700	0.2082	1.267	5.85	280.5	0.105	3.977	0.705
1800	0.1970	1.287	6.07	308.1	0.111	4.379	0.704
1900	0.1858	1.309	6.29	338.5	0.117	4.811	0.704
2000	0.1762	1.338	6.50	369.0	0.124	5.260	0.702
2100	0.1682	1.372	6.72	399.6	0.131	5.715	0.700
2200	0.1602	1.419	6.93	432.6	0.139	6.120	0.707
2300	0.1538	1.482	7.14	464.0	0.149	6.540	0.710
2400	0.1458	1.574	7.35	504.0	0.161	7.020	0.718
2500	0.1394	1.688	7.57	543.5	0.175	7.441	0.730

[†]From Natl. Bur. Stand. (U.S.) Circ. 564, 1955.

Lisa G. Isotermiliste pindade konstandid

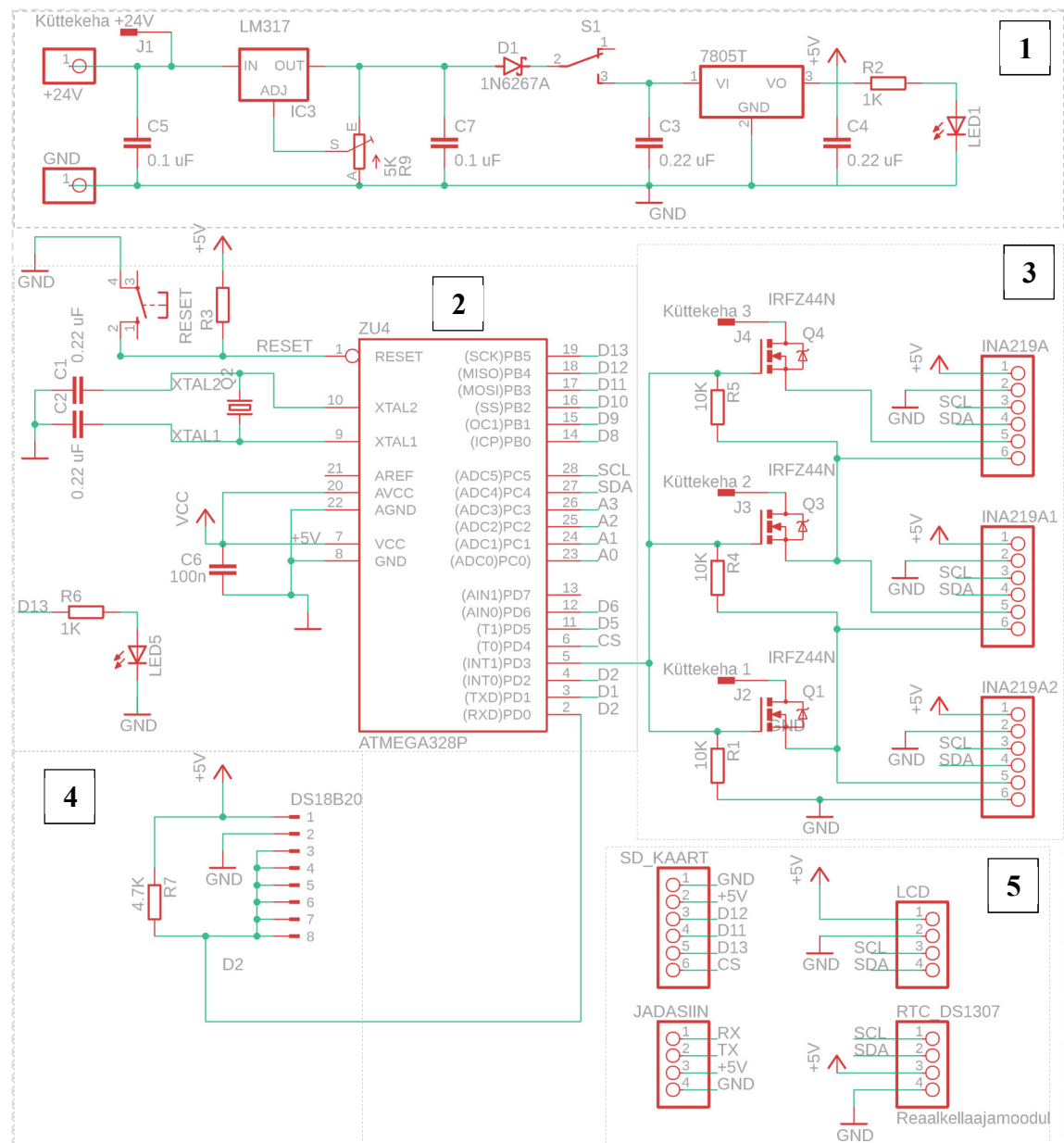
Tabel G. Isotermiliste pindade konstandid [1]

Table 7-1 | Constants for use with Equation (7-25) for isothermal surfaces.

Geometry	$Gr_f Pr_f$	C	m	Reference(s)
Vertical planes and cylinders	10^{-1} – 10^4	Use Fig. 7-5	Use Fig. 7-5	4
	10^4 – 10^9	0.59	$\frac{1}{4}$	4
	10^9 – 10^{13}	0.021	$\frac{2}{5}$	30
	10^9 – 10^{13}	0.10	$\frac{1}{3}$	22, 16 [†]
Horizontal cylinders	0 – 10^{-5}	0.4	0	4
	10^{-5} – 10^4	Use Fig. 7-6	Use Fig. 7-6	4
	10^4 – 10^9	0.53	$\frac{1}{4}$	4
	10^9 – 10^{12}	0.13	$\frac{1}{3}$	4
	10^{-10} – 10^{-2}	0.675	0.058	76 [†]
	10^{-2} – 10^2	1.02	0.148	76 [†]
	10^2 – 10^4	0.850	0.188	76
	10^4 – 10^7	0.480	$\frac{1}{4}$	76
Upper surface of heated plates or lower surface of cooled plates	10^7 – 10^{12}	0.125	$\frac{1}{3}$	76
	2×10^4 – 8×10^6	0.54	$\frac{1}{4}$	44, 52
	8×10^6 – 10^{11}	0.15	$\frac{1}{3}$	44, 52
	10^5 – 10^{11}	0.27	$\frac{1}{4}$	44, 37, 75
Vertical cylinder, height = diameter characteristic length = diameter	10^4 – 10^6	0.775	0.21	77
Irregular solids, characteristic length = distance fluid particle travels in boundary layer	10^4 – 10^9	0.52	$\frac{1}{4}$	78

[†] Preferred.

Lisa H. Juhtkontrolleri trükkplaadi elektriline ühendusskeem



Joonis H.1. Programmiga Eagle loodud juhtkontrolleri trükkplaadi elektriühenduskeem. 1 – toitesüsteem; 2 - kontrolleri Atmega328; 3 – voolusensorid INA219; 4 – temperatuurisensorite DS18B20 ühendusklemmid; 5 – moodulite ühendusklemmid (Sd-kaardi lugeja, jadasiin-ühendus, LCD ekraan, reaalaaja kellamoodul) [21-29]

LIHTLITSENTS

Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Mina, Ronald Kändla
sünniaeg 16.05.1991,

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda koostatud lõputöö
Materjali soojusjuhtivuse ekspressmõõtur,

mille juhendaja on Veli Palge,

- 1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,
- 1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja
- 1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;
3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor _____
(allkiri)

Tartu, 27.05.2019

Juhendaja kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Luban lõputöö kaitsmisele.

(juhendaja nimi ja allkiri)

(kuupäev)